



Modèle hydrologique de prévision de débit pour le bassin versant de la Chamberonne

Marc Broadhurst

Professeur responsable : David Andrew Barry

Encadrant : Luca Rossi

Ecological Engineering Laboratory (ECOL)
bureau e-dric

Résumé

Le bassin versant de la Chamberonne a subi d'importants changements ces dernières années. Cette région originellement rurale s'est progressivement urbanisée. Des surfaces agricoles sont devenues des zones habitables ou des zones industrielles qui ont, à leur tour, engendré un accroissement des sols imperméabilisés. Afin d'élargir l'espace constructible, la rivière a été canalisée et enterrée. Cette transformation de la région a eu comme conséquence l'augmentation des risques de débordement de la Chamberonne et un accroissement de la pollution.

Ce travail de master a comme objectif de développer un modèle hydrologique basé sur le programme Routing System 3.0 dans le but d'avoir un outil efficace d'analyse et de prévision pour les cours d'eau et le réseau d'eaux usées. Ainsi, le bassin versant de la Chambronne a été découpé en sous-bassins versants avec comme objectif la simplification du modèle. Les différentes infrastructures aménagées le long des cours d'eau ont été intégrées dans le modèle, telles que les déversoirs d'orage, les bassins de rétention, les rejets de pompage et les rejets des STEP.

A l'aide du modèle, un bilan des déversements d'orage et de la pollution dans le cours d'eau a été réalisé pour l'année 2013. L'étude de l'impact de divers scénarios a été faite, telle que l'impact de la dérivation du ruisseau de Broye, l'extension du réseau séparatif, la fermeture des STEP et l'augmentation de la population d'ici 2030.

Finalement le modèle peut être utilisé pour faire des prévisions de débit (des données de COSMO-7 ont été intégrées en ce qui concernent les prévisions pluviométriques), ceci en accédant aux prévisions et aux simulations de débit sur l'ensemble des objets du bassin versant (p.ex. tronçon de rivière, déversoirs d'orage, rejets de pompage, etc.) sur le site « chamberonne.swissrivers.ch »

Abstract

The watershed of the Chamberonne has undergone important changes during these last years. This region, originally rural, has been progressively urbanised. Agricultural lands have been transformed into urban and industrial areas, which have lead to an increase in impermeable areas. As a result of the expansion of the built-up space, the river was channelled and hidden underground. The consequence of these modifications has been the growing threat of floods and the rise in pollution.

The goal of this master project is to develop a hydrological model, based on Routing System 3.0, which will be an efficient analytical and predictive tool for rivers and the wastewater networks. To do so, the watershed was divided into sub-watersheds with the aim of simplifying the hydrological model. The different infrastructures along the rivers have also been included, such as sewer overflows, holdings tanks, pumping units and wastewater treatment plants (WWTPs).

With the help of the model, an evaluation of sewer overflows and pollution in the river was carried out for 2013. A study of different hydraulic scenarios was also made, such as the extension of separative sewer networks, the diverting of the Broye stream, the shutting down of the WWTPs and population growth in the region from now until 2030.

Finally, the model can be used for flow predictions (includes pluviometric prediction data from COSMO-7) for all the objects in the watershed - such as a section of the river, storm overflows units, water release from pumping units - on the website “chamberonne.swissrivers.ch »

Remerciement

Lors de mon travail j'ai eu la chance de rencontrer des gens d'une grande compétence qui m'ont aidé tout le long de mon projet.

Pour commencer, un grand merci à Luca Rossi qui a su me donner des conseils de qualités et me motiver lorsque le projet stagnait.

Murielle Thomet du bureau e-dric qui m'a accordé beaucoup de son temps pour développer mon modèle avec bonne humeur. Merci également à toute l'équipe e-dric qui a égayé les pauses café avec des discussions.

Yves Chatelain qui m'a fourni les données SIG et les documents relatifs à la Chamberonne. Egalement Blaise Cordey de la DGE qui m'a fourni dans les brefs délais les mesures de débits et pluviométriques.

Pierre Queloz qui m'a fourni les données limnimétrique et pluviométrique du laboratoire ECHO.

Romuald Curdy du bureau RIBI qui m'a fourni les PGEE et les données limnimétriques mesurées sur les déversoirs et son aide sur le fonctionnement des différents ouvrages.

Mohsen Cheraghi et Elisa Bruque Pozas pour les discussions à l'EPFL.

Table des matières

RESUME	3
ABSTRACT	4
REMERCIEMENT.....	5
LISTE DES ACRONYMES	8
I. INTRODUCTION	10
II. BASSIN VERSANT DE LA CHAMBERONNE.....	12
A. DESCRIPTION GENERAL	12
B. PROBLEMES IDENTIFIES	13
C. STEP.....	15
D. DECOUPAGE DU BASSIN-VERSANT.....	16
E. DEVERSOIRS D'ORAGE.....	17
F. BASSIN DE RETENTION	18
G. ZONE A RISQUE D'INONDATION	20
III. DONNEE DE BASE.....	22
A. DONNEES METEOROLOGIQUE.....	22
1. Mesure.....	22
2. Prédiction.....	23
B. ESTIMATION DES DEBITS.....	24
1. Stations limnimétriques.....	24
2. Campagne de mesure de débit sur le réseau d'eaux usées.....	27
C. GENERATION DES EAUX USEES	27
D. POMPAGE D'EAU PAR L'EPFL ET L'UNIL.....	28
IV. MODELE HYDROLOGIQUE	30
A. ROUTING SYSTEM 3.0	30
1. Introduction	30
2. Outils utilisés pour le projet.....	31
3. Structure du modèle.....	33
V. RESULTAT.....	36
A. CALAGE	36
B. CALAGE POUR LA PÉRIODE DU 01.10.2012 AU 01.10.2013	37
1. Calage des paramètres hydrologiques	37
2. Calage de réseau d'eau usée.....	42
C. CRUE DU 26.07.2008 CALAGE DES BASSINS DE RETENTION.....	43
1. Pluviométrie	44
2. Résultat de la simulation aux stations limnimétriques.....	45
3. Simulation des débordements	46
4. Fonctionnement des déversoirs de sécurité des bassins de rétention.....	46
5. Efficacité des bassins de rétention.....	47
D. ANALYSE DE LA POLLUTION PAR LES EAUX USEES ET LES EAUX DE RUISSELLEMENT.....	48
1. Déversoir d'orage.....	48
2. Bilan pollutif à l'embouchure de la Chamberonne.....	50
3. Estimation de concentration de E.Coli et d'Enterocoque dans la Chamberonne et la baie de Vidy	51
E. SCENARIO	52
1. Le ruisseau de Broye	52
2. Scénario extension du réseau séparatif.....	55
3. Scénario fermeture des STEP.....	56
4. Simulation du bassin versant pour 2030.....	57
F. PREVISION DE DEBIT.....	59

VI. DISCUSSION.....	62
A. FIABILITE DU MODELE HYDROLOGIQUE.....	62
B. UTILITE D'UN MODELE DE PREDICTION.....	62
1. <i>Système d'alarme de crue</i>	62
2. <i>Outil d'étude</i>	63
C. EVOLUTION DU BASSIN VERSANT DE LA CHAMBERONNE	63
D. LABORATOIRE TAILLE REEL POUR LES HAUTES ECOLES.....	64
VII. CONCLUSION.....	65
VIII.REFERENCE	66
IX. ANNEXE	68
A. DEVERSOIR D'ORAGE.....	68
B. BASSINS DE RETENTION	77
C. CAPACITE HYDRAULIQUE DES ZONES A RISQUE D'INONDATION	81
D. STATIONS LIMNIMETRIQUE.....	85
E. HYETOGRAMMES DU BASSINS VERSANT DE LA CHAMBERONNE SELON LES VALEURS RADAR FOURNI PAR METEOSUISSE.....	88

Liste des acronymes

DBO5 : Demande Biologique en Oxygène

DCO : Demande Chimique en oxygène

DGE : Direction Général de l'Environnement (Vaud)

MES : Matière en suspension

OFEV : Office Fédéral de l'Environnement

PGEE : Plan de Gestion d'Evacuation des Eaux Intercommunal

PGEEi : Plan de Gestion d'Evacuation des Eaux intercommunal

PREE: Plan régional d'Evacuation des Eaux

SDOL : Schéma Directeur Ouest-Lausannois

STEP : Station d'Epuration des eaux usées.

I. Introduction

Le bassin versant de la Chamberonne, qui se situe dans la partie Ouest-lausannoise, est composé de deux rivières avec des caractéristiques similaires qui confluent et se jettent dans le lac. C'est un bassin de petite envergure, environ 40 km², qui a subi une forte urbanisation pendant ces dernières décennies. Plusieurs tronçons de rivières ont été enterrés pour passer sous les zones urbaines comme le voûtage qui passe sous Renens. Certaines zones naturelles ou agricoles ont été remplacées par des zones industrielles, des quartiers d'habitations ou des voies de communication. Ainsi, l'imperméabilisation du sol, ainsi que la densification du réseau d'eau de ruissellement ont modifié considérablement le régime hydrologique du bassin versant. La capacité hydraulique est nettement insuffisante en cas de forte pluie, des investissements ont été faits dans les années 1990 (Jarrar I et Consuegra D., 1996) pour mettre en place des infrastructures améliorant la protection des zones urbaines contre les crues: quatre bassins de rétention ont été construits le long des deux cours d'eau en 2001. Toutefois, les conséquences de la dégradation des rivières continuent. Malgré les infrastructures de protection, la région a subi une importante crue en 2007 provoquant d'importants dégâts matériels (AquaVision, 2009). Par ailleurs, on observe un appauvrissement de la vie aquatique (Schneider, 2009) et une augmentation de la pollution, d'origine agricole ou urbaine, des rivières. La pollution agricole provient des produits phytosanitaires déversés sur les champs qui s'infiltrent dans le sol et finissent dans la rivière. Les sources de pollutions urbaines proviennent d'une part des eaux de ruissellement qui contiennent des hydrocarbures et d'autres produits chimiques (p.ex. le médocrop), d'autre part on a retrouvé des concentrations élevées, provenant d'événement pluvieux, dans la baie de Vidy de bactéries fécales (Rossi L. et Chesaux L., 2013). Ces bactéries résultent des déversoirs d'orage du réseau d'eau usée, mais également du mauvais état à certains endroits des collecteurs d'eau usée (Porquedu, P., Sengül, G., 2009).

Le bassin versant de la Chamberonne a fait l'objet de nombreuses études: étude sur la qualité des eaux (Rossi L. et Chesaux L., 2013), sur la capacité hydraulique de la rivière (Jarrar, I., Consuegra, D., 1996), sur le réseau d'eau usée (Martinerie, 2010) ou encore sur la gestion des eaux usées (Broadhurst, 2013). Pour chacun de ces aspects, il a fallu réunir des données météorologique, limnimétrique et géographique.

L'un des objectifs de cette étude est de concevoir un outil (modèle hydrologique) qui servirait de base pour les différentes études scientifiques. Cet outil pourrait permettre, dans un premier temps, d'accéder à un historique des écoulements dans le bassin versant. En effet, que ce soit pour étudier la quantité d'eau usée déversée dans la rivière, la dilution d'un polluant ou encore l'érosion des berges, il est nécessaire de connaître les débits à plusieurs endroits de la rivière et ceci à différentes périodes de l'année. Il est également utile d'avoir des prévisions de débits afin de programmer les mesures qui s'imposent sur le terrain, telles que mesurer le débit sur un tronçon pour déterminer la courbe de tarage, définir l'évolution des ouvrages hydrauliques ou encore planifier un échantillonnage. Finalement, avec un modèle hydrologique il serait possible de tester différents scénarios, tels que l'impact d'une augmentation de la population à l'intérieur du bassin versant ou encore la modification des infrastructures déjà en place. Ainsi, il sera possible de trouver des solutions aux problèmes qui touchent le bassin versant qui sont la capacité hydraulique insuffisante des cours d'eau, la pollution de la baie de Vidy en analysant les déversements, la pollution provenant des eaux de ruissellement, le lessivage des terres agricoles, des déversements d'eau usée et du mauvais état du récepteur d'eaux usées.

L'autre objectif est de développer un modèle de prévision de crue basé sur les précipitations anticipées. Cet outil de prévision permettrait d'identifier les zones inondables à risques d'où une meilleur efficacité pour gérer les crues en déclenchant rapidement des mesures de sécurité en cas d'alerte. A l'heure actuelle le système d'alerte pour les crues est basé sur les prévisions de MétéoSuisse qui alerte sur les risques de fortes pluies, de plus on peut consulter une carte vigilance pour les petits et moyens cours d'eau signalant un risque sans spécifier ni l'intensité ni l'emplacement

exact de l'événement (OFEV: <http://www.hydrodaten.admin.ch/warnungen-vorhersagen/fr/#hochwasserlage>).

Dans la première partie de cette étude une présentation de la zone en question sera faite contenant des informations sur les cours d'eau, les infrastructures installées, les problèmes identifiés concernant l'hydrologie du bassin, ainsi qu'une revue des différents travaux déjà effectués concernant la Chamberonne. Dans la deuxième partie, il sera indiqué les données utilisées pour établir le modèle hydrologique. La troisième partie décrira rapidement le fonctionnement du modèle utilisé, ainsi que la modélisation du bassin versant. La quatrième partie concerne l'analyse des résultats de la simulation après le calage, tel que le bilan des déversoirs ainsi que différents scénarios de futur développement de la région.

La cinquième partie conclue le travail avec des remarques sur la qualité du modèle, l'utilité de ce type d'outil et ainsi que l'évolution de la région.

Le tableau 1 récapitule les informations principales pour les différentes communes. La partie supérieure du bassin est surtout rurale et la partie inférieure est en majorité urbaine. Plus de 43 % de la surface est agricole et il est estimé que 37% de celle-ci a été imperméabilisée (Rossi L. et Chesaux L., 2013).

Nom de la commune	Surface totale de la commune [ha]	Pourcentage du BV par commune [%]	Pourcentage de commune inclus dans le BV [%]	Hab.connecté aux collecteurs d'eau usée	Etat du PGEE
Bioley-Orjulaz	312	0.26	3	-	
Bournens	389	0.28	3	10	
Boussens	315	7	85	-	
Bussigny-près-Lausanne	482	2	16	8122	
Chavannes-près-Renens	165	4	100	7058	
Cheseaux-sur-Lausanne	460	12	100	3955	En cours
Crissier	550	14	100	7402	Approuvé
Cugy (VD)	295	5	62	-	
Ecublens (VD)	571	4	31	3542	Approuvé
Etagnières	380	6	60	-	
Jouxens-Mézery	193	5	100	1353	Approuvé
Lausanne	4136	11	11	14346	En cours
Le Mont-sur-Lausanne	981	6	23	-	En cours
Mex (VD)	290	1	11	-	
Morrens (VD)	368	5	54	-	En cours
Prilly	219	2	39	-	
Renens (VD)	296	6	74	20232	Approuvé
Romanel-sur-Lausanne	287	5	74	2432	En cours
Saint-Sulpice (VD)	185	0.04	1	3305	
Sullens	385	2	22	-	
Villars-Sainte-Croix	166	3	64	421	En cours
Total	11'425	100	-	72178	

Table 1: Récapitulatif de la surface total des communes et le pourcentage contenu dans le bassin versant, du nombre d'habitants et l'état du PGEE (source: Schneider, 2009)

B. Problèmes identifiés

Plusieurs problèmes ont été identifiés et notamment ceux de la baie de Vidy où la Chambronne se jette. Lors de forts événements de pluie des bactéries pathogènes et des pesticides ont été retrouvés dans la baie, ces agents infectieux et toxiques peuvent être dangereux pour la santé des baigneurs. L'évaluation lors d'événements de forte pluie des eaux de baignade fait que la baie est classée, à ces moments, dans la classe D (Schaffner, M., Studer, P. Ramseier, C. (2013), indiquant que la baignade est interdite.

Dans l'étude *Source diffuse de micropolluants dans le lac Léman : Etude par bassin versant spécifique et définition d'outils d'extrapolation*, des mesures de concentrations de différentes substances chimiques ont été réalisées lors d'une campagne de prélèvements à différentes emplacements le long de la Mèbre et de la Sorge par temps sec et temps de pluie. Plusieurs pesticides ont été retrouvés en faible quantité de l'ordre de 10 ng.l⁻¹ (voir tableau 2). Des concentrations plus élevées d'Atrazine, Diuron, Mécoprop, Diazinon et Terbutylazine ont été trouvées lors d'événements de pluie. Ces composants chimiques témoignent d'un lessivage des sols agricoles. Certaines substances, comme le Mécoprop, proviennent également des zones urbaines. La concentration de Diazinon et Terbutylazine dépassent les normes de qualité environnementale (NQE) lors

d'événements pluvieux, ce qui influe négativement sur la vie aquatique - si les organismes aquatiques sont exposés à une concentration de polluant trop élevée ou pour une durée trop longue, cela peut avoir un effet fatal sur ceux-ci.

Table 2: Concentration mesurées dans la Chamberonne lors des campagnes de mesure par temps sec et temps de pluie. Les caes en couleur correspondent à des valeurs supérieures aux valeurs d'effets. NA: non analysé (source: L.Rossi et L. Chesaux, 2013)

Concentration en ng/L			Chamberonne							
			Temps sec				Temps pluie			
Substances	LOQ	LOD	Méd.	Moy.	min	max	Méd.	Moy.	min	max
Atrazine	0.3	0.1	10.6	12.6	7.5	22.5	10.0	16.1	NA	58.3
Benzotriazole	6	2	181.0	245.1	164.6	373.7	445.4	595.5	NA	2300.5
Carbendazime	6	2	4.5	3.0	NA	5.8	<LOD	2.0	NA	14.5
Chloridazon	6	2	<LOD	1.3	<LOD	6.4	<LOD	5.9	<LOD	45.9
Chlortoluron	6	2	7.4	7.4	<LOD	15.4	<LOD	4.6	NA	18.4
Diazinon	6	2	<LOD	<LOD	NA	<LOD	<LOD	5.0	<LOD	62.4
Diuron	6	2	12.3	13.8	NA	31.5	NA	20.9	NA	142.3
Ethofémusate	6	2	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Irgarol	1.8	0.6	<LOD	<LOD	<LOD	3.4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Isoproturon	3	1	<LOD	<LOD	NA	<LOD	NA	<LOD	NA	<LOD
Mécoprop	3	1	<LOD	0.7	NA	3.3	630.0	940.0	NA	3497.1
Métamitron	70	23	<LOD	22.2	<LOD	71.7	NA	8.8	NA	145.5
Méthylbenzotriazole	6	2	113.5	119.5	78.0	157.3	438.0	465.7	NA	1593.9
Propiconazole	6	2	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Pymétrozine	60	20	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Tébufénozide	A titre indicatif		<LOD	<LOD	NA	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Terbutylazine	6	2	<LOD	1.1	<LOD	5.5	5.4	27.7	NA	212.7
Terbutrine	1	0.3	2.2	2.2	1.8	2.7	2.9	4.7	<LOD	54.5
Triclosan	60	20	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	NA	<LOD

A l'origine les bactéries proviennent du récepteur d'eau usée qui longe la Mère et la Sorge, les fuites du récepteur et les déversements des déversoirs d'orages se retrouvent immédiatement dans les cours d'eau puis dans le lac. Il est important de noter que la baie de Vidy est la plus importante zone de baignade du lac pour la région de Lausanne. De plus, Eauservice pompe l'eau de consommation courante à quelques centaines de mètre de l'embouchure de la Chamberonne. Afin d'améliorer la qualité de cette zone de détente, la dépollution des eaux de la Chamberonne est nécessaire. Les communes du bassin versant ont pris conscience de cette problématique et ont décidé de se réunir une fois par an avec un responsable du canton afin de trouver des solutions. Le premier rendez-vous, tenu en 2003, fut avec les communes du PGEEi uniquement, puis en 2008 ce fut avec toutes les communes du bassin versant. Malheureusement, tout le monde comprend la nécessité d'agir, mais personne n'est prêt à investir pour prendre des mesures concrètes.

Le PGEEi (Porqueddu et Sengül, 2009) a permis la mise en évidence des problèmes provoqués par l'état défectueux du récepteur d'eaux usées : l'obstruction des canalisations par des racines à certains endroits, la mauvaise étanchéité due à des fissurations et au décalage des joints, l'érosion des parois engendrée par le vieillissement des conduites et la réduction ponctuelle du diamètre de la canalisation. Le PGEEi a coordonné la réhabilitation de plusieurs secteurs. En plus des problèmes bactériens liés à la qualité et l'étanchéité des canalisations, on constate la présence de déchets solides tels que du papier toilette lorsque le déversoir déborde. En effet, les déversoirs d'orages ne sont pas équipés de grilles qui empêcheraient ces déchets de finir dans les cours d'eau. Toutefois, M. Philippe Hohl de la DGE a informé que cela sera fait prochainement.

De plus, si le canton souhaite raccorder les communes en amont de la STEP de Vidy et de collecter les eaux usées avec le collecteur existant, un sérieux problème de capacité se posera. Pour y remédier il faudrait réduire la quantité d'eau claire pluviale et parasite, notamment en mettant en place un réseau d'égout séparatif des eaux usées et des eaux de ruissellement. Actuellement, les eaux de ruissellement sont directement rejetées dans les cours d'eau. Afin d'éviter un risque de pollution (métaux lourds et Mécoprop par exemple), il faudrait veiller à contrôler la qualité de ces eaux. De plus, selon M.

Philippe Hohl il n'est pas possible d'augmenter la charge hydraulique des cours d'eau sans risquer de nouvelles inondations. Pour cette raison, il ne délivre plus aux communes des permissions de développer indépendamment leurs réseaux séparatifs. Le plan d'action, dans un premier temps, est de réduire la charge hydraulique en déviant le ruisseau de la Broye qui conflue avec la Mèbre à Chavannes-Près-Renens. Une étude de faisabilité de la construction d'un tunnel permettant à la Broye de se jeter directement dans le lac va être faite par le bureau RIBIS SA pour l'été 2014. Cela permettrait de réduire suffisamment le volume d'eau dans la Chambronne pour, par la suite, continuer le développement du réseau séparatif. Cependant, le coût des travaux est estimé entre 20 et 40 millions de francs suisses.

Finalement, à plusieurs endroits l'accès aux berges des rivières par le public est impossible, soit parce qu'elles sont enfouies, soit parce qu'elles ont été canalisées pour permettre le développement urbain. La qualité paysagère a été souvent ignorée. Néanmoins, les communes Ouest-Lausannoises, soucieuses du développement de la région, se sont réunies pour trouver un moyen de préserver la qualité de vie de la région. Il en est sorti le Schéma Directeur Ouest-Lausannois (SDOL) qui fixe les objectifs à longs termes de l'aménagement du territoire en traitant les thématiques du transport, de mobilité douce et des espaces publics. Malgré les bienfaits et l'agrément qu'apportent les eaux de surface à une région, ce thème n'est quasiment jamais abordé.

Cependant, la zone industrielle Ley-Outre dans la commune de Crissier longeant la Mèbre a été classée en zone de logement, ainsi le SDOL a planifié la renaturation de l'espace longeant la Mèbre. La table 3 synthétise les problèmes principaux qui touchent les cours d'eau du bassin versant.



Figure 2: Canal de la Sorge fortement canalisé juste avant la jonction avec la Mèbre

Problèmes identifiés sur la Chamberonne
Pollution par des produits chimiques d'origine agricole, industrielle et urbaine
Pollution de la baie de Vidy par des bactéries pathogènes
Etat défectueux du récepteur d'eaux usées
Capacité hydraulique de la Chamberonne insuffisante

Table 3: Synthèse des problèmes identifiés sur le bassin versant

C. STEP

La partie supérieur du bassin versant est équipé de trois STEP de faible capacité : la STEP de Boussens et de Morrens avec une capacité de moins de 2000 équivalent habitants et la STEP de Cugy avec une capacité entre 2000 et 10'000 équivalent habitants. Les communes situées en aval sont, quant à elle, connectées à la STEP de Vidy qui a une capacité supérieure à 220'000 équivalent habitants. Les collecteurs d'eaux usées sont placés le long de la Sorge, de la Mèbre et de la Chamberonne.

Les collecteurs d'eaux usées de la partie amont n'ont pas été intégrés dans le modèle, cependant dans le but de reproduire le plus fidèlement possible le comportement hydrologique de la partie amont, les rejets des trois STEP ont été intégrés dans le modèle. En se basant sur le bilan 2012 de l'épuration vaudoise (J.-M. Rietsch, R. Vallier, 2012), le nombre d'équivalent habitant raccordé a pu être déterminé. Le tableau 4 résume les informations principales

Station d'épuration	date construction	Procédé	EH*	L/EH.J
Boussens	1992	BAAP	917	187
Cugy	1973 (modifié en 1994)	BAMC	1459	415
Lausanne	1965 (modifié en 1976)	BAMC	223667	501
Morrens	1994	BAAP	536	255

Table 4: Information général sur les stations d'épurations du bassin versant.
Procédé BAAP : boue activé – aération prolongé. Procédé BAMC : Boue activé moyenne charge. (source : Rietsch, J.-M., Vallier, R., 2012)

Le nombre d'équivalent habitant raccordé a été estimé à partir des teneurs des eaux usées en demande biologique en oxygène (DBO5) arrivant aux STEP. La consommation d'eau par habitant a été définie par rapport aux rejets d'eau et le nombre d'équivalent habitant.

D. Découpage du bassin-versant

Afin de réaliser une modélisation hydrologique de la zone, le bassin versant a été découpé en sous-bassins versants. Le découpage a été effectué en deux parties: la partie qui n'est pas raccordée aux collecteurs d'eaux usées est nommée « naturelle » et celle raccordée est nommée « raccordée ». Le bureau e-dric s'est chargé du découpage de la partie « naturelle » en 16 sous-bassins versants (voir figure 3) pour simuler le comportement hydrologique naturel (Martinerie R., 2010).

Le découpage de la partie « raccordée » a été effectué par le service d'assainissement de Lausanne. En se basant sur le plan des canalisations et sur les écoulements naturels, la zone a été séparée en 48 sous-bassins versants (Martinerie R., 2010). La Figure 3 montre le découpage en sous-bassins versants (naturelle et raccordée) avec le réseau d'eaux usées des communes reliées à la STEP de Vidy.

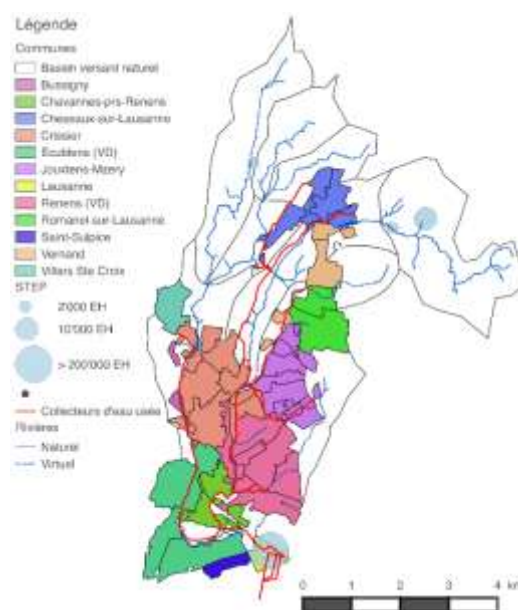


Figure 3: Découpage du bassin versant en 16 sous bassin versant naturel et 48 sous bassin versant urbains réalisé par le bureau e-dric (source : Martinerie, 2010)

Le Tableau 5 résume les données des sous-bassins versants raccordés (surface, équivalent habitant, taux d'imperméabilité, taux séparatif). La surface total du bassin versant est légèrement plus élevée que celle du bassin versant hydrologique car la commune de Saint-Sulpice a été rajoutée étant raccordée aux collecteurs d'eaux usées de la STEP de Vidy.

Les communes raccordées sont équipées en théorie de réseaux séparatifs ceci pour 82% en moyenne (collecteurs d'eau usées et collecteurs d'eaux de ruissellement), ce qui est nettement plus élevé que la partie Est de Lausanne qui est connectée à 58%. Plusieurs communes ont un taux de réseaux séparatifs supérieur à 90%, tels que Bussigny ou Chavannes, alors que Renens est à 58%. Pour des raisons de capacité hydraulique de la Chamberonne, la DGE ne délivre plus de permis d'extension des réseaux séparatifs (entretien avec P.Hohl, DGE en octobre 2013).

Le taux de surface imperméabilisée des communes est de 40% en moyenne (voir table 5), ce qui est déjà élevé et va continuer à augmenter durant les prochaines années. Le taux de surface imperméabilisé des sous bassins versants naturels a été fixé à 0% pour simplifier le modèle.

Commune	Aire Totale (ha)	Taux Imp %	Equivalent-Habitants #	Taux Séparatif %
Bussigny	12.5	70 %	332	0.4 %
Chavannes	80.1	37 %	5992	7.8 %
Cheseaux	124.8	39 %	6861	8.9 %
Crissier	282.7	49 %	7000	9.1 %
Ecublens	246.9	43 %	16960	22.0 %
Jouxens	171.9	22 %	1410	1.8 %
Renens	287.8	45 %	22236	28.9 %
Romanel	120.7	30 %	5933	7.7 %
Saint Sulpice	158.9	32 %	4628	6.0 %
Vernand	83.5	44 %	4775	6.2 %
Villars Ste Croix	52.2	51 %	932	1.2 %
Total BV urbanisés	1622	40 %	77059	100 %
Total BV naturels	2506	0 %	0	0.0 %
Total BV Chamberonne	4128	16 %	77059	100.0 %

Table 5: Information sur la surface, le taux d'imperméabilisation, le nombre d'équivalent habitants et le taux séparatif des communes

E. Déversoirs d'orage

Le réseau d'eaux usées a été équipé d'une multitude de déversoirs d'orage et de trop-pleins (voir figure 4). Le rôle de ces ouvrages est de limiter l'apport d'eau aux STEP en cas de forte pluie et ainsi d'éviter la saturation des conduites et les inondations en zones urbaines. Pour simplifier le modèle, seuls les déversoirs principaux ont été utilisés. Le projet sur l'état des canalisations de la partie Est-Lausanoise réalisé par e-dric pour la commune de Lausanne a permis d'en identifier neuf.

Pour chacun de ces déversoirs une fiche technique a été réalisée (Martinerie R., 2010) indiquant leurs fonctionnement, les hypothèses et les modes de calcul pour obtenir la courbe Débit entrant/Débit dérivé (voir annexe A.)

Durant les quatre premiers mois de 2014, le bureau RIBI a mesuré la hauteur d'eau à l'entrée du déversoir DO330, situé en amont du Pontet et la sortie du déversoir DO11-12, qui se situe en amont de la Chamberonne. Ces mesures ont permis de caler les paramètres de production d'eaux usées tels que le taux de séparation des eaux et surtout le taux d'eau claire parasite déversé dans le récepteur.

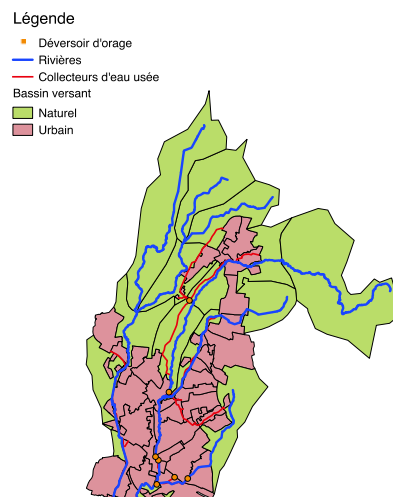


Figure 4: Emplacement des déversoirs d'orage du bassin versant

F. Bassin de rétention

En 1996, les communes de l'Ouest-Lausannois se sont réunies pour faire une analyse hydrologique du bassin versant afin de calculer les débits maximaux dans les cours d'eau (Jarra I., Consuegra, D., 1996). Le résultat de cette analyse a été la construction en 2004 de quatre bassins de rétentions permettant de lutter contre les crues pour un temps de retour de 100 ans (voir figure 5).

Les quatre ouvrages ont été modélisés sous HEC-RAS¹ par le Laboratoire de Construction Hydraulique à l'EPFL pour déterminer leur fonctionnement, puis par le bureau AquaVision pour l'étude sur la crue survenue en juillet 2008 (AquaVision, 2009). Ainsi, la relation niveau d'eau/volume retenue et les coefficients de débit ont pu être déterminés. Les bassins de rétention sont équipés d'orifice de forme rectangulaire et de déversoir frontal. Ils sont caractérisés par trois types d'écoulement selon le niveau d'eau. Le premier est l'écoulement à surface libre à travers l'orifice lorsque le niveau d'eau est inférieur à la hauteur de l'orifice. Le débit peut être déterminé à l'aide de la formule mathématique:

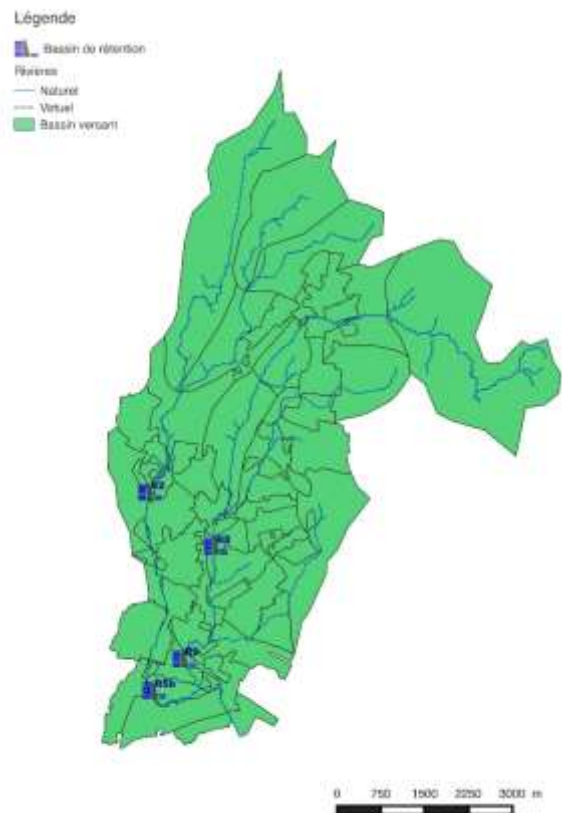


Figure 5: Emplacement des quatre bassins de rétention dans le bassin versant

$$Q = C_{DO} \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H'^{3/2}$$

Q : débit sortant de l'orifice [m^3/s] lorsque l'écoulement est en nappe libre

C_{DO} : coefficient de débit de l'orifice en écoulement en surface libre [-]

g : gravité [m/s^2]

b : largeur de l'orifice [m]

H' : charge en amont de l'orifice [m]

¹ <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

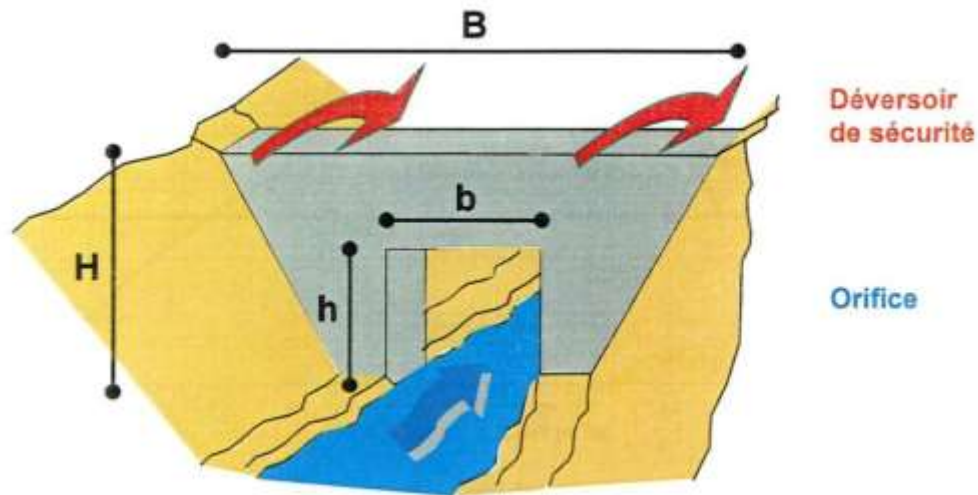


Figure 6: Schéma d'un déversoir de sécurité avec un orifice de sécurité (source: Aquavision, 2009)

Si le débit augmente et que le niveau d'eau atteint la hauteur de l'orifice on passe à un écoulement en charge. Il en résulte que le niveau d'eau monte rapidement et ainsi une partie du débit est retenue. La formule mathématique s'exprime comme ceci:

$$Q = C_{DCH} \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2g \cdot H'}$$

Q : débit sortant de l'orifice [m^3/s] lorsque l'orifice est en charge

C_{DCH} : coefficient de l'écoulement en charge [-]

b : largeur de l'orifice [m]

g : gravité [m/s^2]

h : hauteur de l'orifice [m]

H' : charge en amont de l'orifice [m]

Lorsque la retenue atteint son maximum, le déversoir de sécurité se met en fonction. Si les ouvrages ont été dimensionnés correctement ils devraient se mettre en fonction que lors de crue extrême. Pour calculer le débit déversé on peut utiliser cette expression mathématique:

$$Q = C_{DS} \cdot B \cdot \sqrt{2g} \cdot (H' - H)^{3/2}$$

Q : Débit déversé [m^3/s]

C_{DS} : Coefficient de débit du déversoir de sécurité [-]

B : largeur du déversoir de sécurité [m]

g : gravité [m/s^2]

$H'-H$: charge au-dessus du déversoir [m]

Une fiche récapitulative (voir annexe B.) des quatre bassins a été élaborée avec les différentes hypothèses de calcul, la courbe niveau d'eau/volume retenue et la courbe débit/niveau d'eau. Les relations ont été recalculées à partir des données fournies par Aquavision (AquaVision, 2009), le LCH (LCH-EPFL (b), 1999) et des mesures sur le terrain.

G. Zone à risque d'inondation

La Direction Général de l'Environnement (DGE) a défini les zones présentant un risque d'inondation pouvant présenter un danger matériel ou humain (voir figure 7). Pour chaque zone, il a été possible de déterminer la capacité hydraulique à partir d'une étude réalisée par le LCH qui a déterminé la capacité hydraulique sur tout le réseau hydrologique de la Chamberonne (LCH (a), 1999)

Ainsi, pour chacune des zones un point a été choisi afin de déterminer différents niveaux de risque. Par exemple, pour le voûtage V9, le point d'alerte a été placé à l'entrée. Il a été déterminé pour quel débit l'eau sort de son lit (voir figure 8).



Figure 7: Zone à risque d'innondation le long de la Sorgue et la Mèbre défini par la DGE

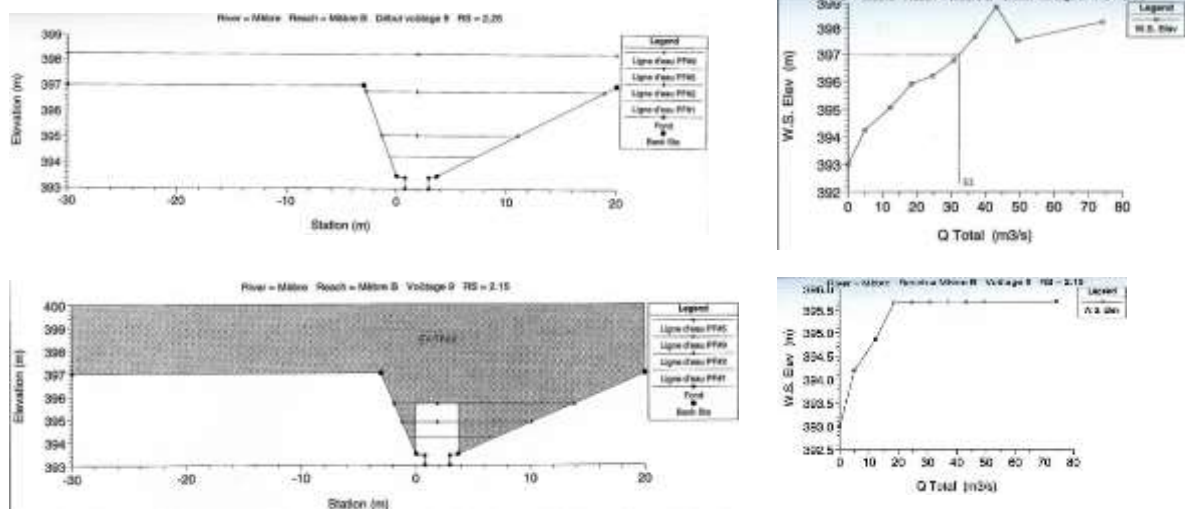


Figure 8: Profil et capacité du voûtage 9 calculé par le LCH (source: LCH, 1999)

Dans cet exemple (figure 8), la rivière sort de son lit pour un débit de 32 m³/s. Il a été déterminé également le débit pour lequel le voûtage est chargé à 50%, 80% et 100%. Ainsi, pour un débit de 9 [m³/s] le voûtage est chargé à 50%, pour un débit de 14.4 [m³/s] le voûtage est chargé à 80% et pour un débit de 18 m³/s, l'écoulement dans le voûtage se met en charge. Pour chaque point situé en amont d'un voûtage, la même méthode a été appliquée (voir annexe C).

	50% rempli [m ³ /s]	80% rempli [m ³ /s]	En Chage [m ³ /s]	Débordement en amont [m ³ /s]
Voutage 2	8	12.8	16	24
Voutage 4	8	12.8	16	24
Voutage 5	8	12.8	16	24
Voutage 8	6.5	10.4	13	47
Voutage 9	9	14.4	18	32

Table 6: Alarmes des voutages défini pour le modèle de prédiction

Pour la zone de Mèbre aval et de Chamberonne, l'alerte a été fixé selon quatre temps de retour de débit: 2.33 ans, 10 ans, 50 ans et 100 ans. Les temps de retour ont été calculés par Hydram (EPFL) dans une étude hydrologique du bassin versant de la Mèbre – Sorge (Jarrar, I., Consuegra, D., 1996). Ces différents niveaux d'alarme seront repris dans le modèle présenté dans le chapitre V.f

	Tr=2.33 ans [m ³ /s]	Tr=10 ans [m ³ /s]	Tr=50 ans [m ³ /s]	Tr=100 ans [m ³ /s]
Mèbre aval (station)	15	24	40	51.2
Chamberonne (station)	34	54	91	118

Table 7: Temps retour des débits pour Mèbre aval et Chamberonne choisi pour le système d'alarme du modèle de prévision de débit

III. Donnée de base

A. Données météorologique

1. Mesure

Pour caler le modèle hydrologique, les données météorologique de trois stations ont été utilisées: celle de Crissier, de Pully et de l'EPFL (voir figure 9). Et pour la simulation en temps réel de débit, les données de pluie et de température de la station de Pully ont été récupérées. Une fiche pour chaque station a été écrite indiquant les facteurs mesurés, la période utilisée et leurs emplacements (voir table 8).

Ces trois stations permettent d'avoir une bonne approximation des intensités de pluie sur le bassin versant pour des pluies normales. Toutefois, lors de forts événements pluvieux, tels que des orages d'été, il se peut que les mesures à disposition ne reproduisent pas les précipitations observées sur l'ensemble du bassin. Par exemple, pendant le crue du 26 juillet 2008, des intensités de pluie allant jusqu'à 100 mm/h ont été enregistrées sur le haut du bassin versant alors que plus en aval pour la même durée, l'intensité de dépassait pas les 10 mm/h (AquaVision, 2009)

La température de l'air est mesurée à quelques dizaines centimètres du sol. Il se peut que la température soit influencée par la chaleur diffuse émise par les bâtiments autour. Malgré un facteur de correction en fonction de l'altitude pour estimer la température pour chaque sous-bassin versant, aucune différence n'a été faite entre la partie rurale et la partie urbaine.



Figure 9: Stations météorologiques utilisées pour la modèle hydrologique

Station	Crissier
Propriétaire	DGE (canton de Vaud)
Coordonnées	534710/155835
Facteurs mesurés	T (°C), P (mm/h)
Fréquence de mesure	1h ou 10min
Période	01.01.2006 au 15.04.2014

Station	Pully
Propriétaire	DGE (canton de Vaud)
Coordonnées	540811/151514
Facteurs mesurés	T (°C), P (mm/h)
Fréquence de mesure	1h
Période	01.01.1980 au 15.04.2014

Table 8: Récapitulatif des paramètres mesurés et la période des données utilisée des stations météorologiques

Station	EPFL
Propriétaire	ECHO (EPFL)
Coordonnées	533142/152604
Facteurs mesurés	T (°C), P (mm/h), Rayonnement , Humidité relative
Fréquence de mesure	15min
Période	30.06.2011 au 01.04.2014

2. Prédiction

Pour les prédictions de précipitation et de température, les prévisions du modèle COSMO² sont utilisées. Ce modèle est basé sur des équations thermo-hydrodynamiques qui permettent de décrire les processus atmosphériques, ainsi que ceux de surface comme la conservation d'énergie, les transformations de phase et les radiations. Le modèle COSMO est basé sur un modèle à maille large ECMWF³ qui couvre toute l'Europe. A partir de ce modèle il est possible de définir les conditions de bord initiales pour une maille plus fine qui couvre la Suisse, le modèle COSMO-7 fournit des prédictions pour les 72 heures suivantes. Ces données sont actualisées deux fois par jour.

² http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/fr/meteo/previsions_numeriques/Produits/cosmo-2_cosmo-7.html

³ <http://www.ecmwf.int/>

B. Estimation des débits

Afin de caler le modèle hydrologique et le réseau d'eau usée, il a fallu obtenir des mesures de débit dans les rivières et dans le collecteur d'eaux usées.

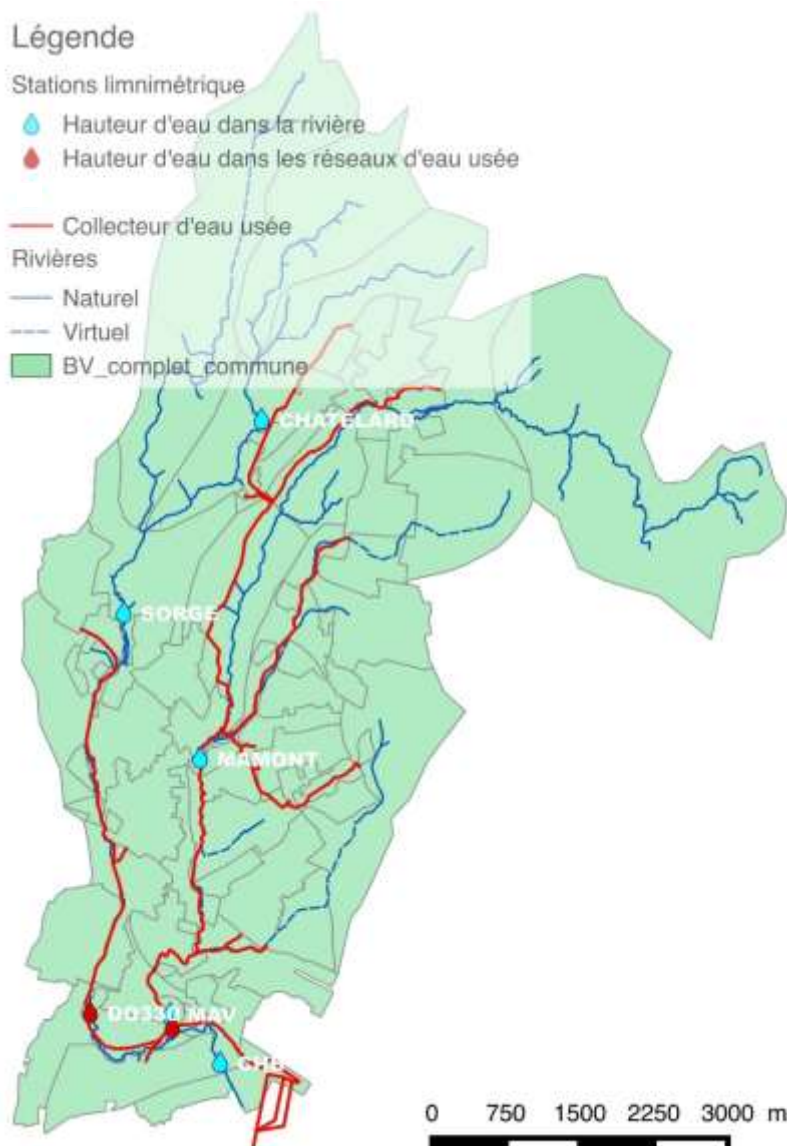


Figure 10: Emplacement des station limnimétriques sur les cours d'eaux et emplacement des campagnes de mesure sur le réseau d'eaux usées

1. Stations limnimétriques

Pour caler les paramètres du modèle hydrologique il a fallu utiliser des mesures de débit pour les rivières, comme pour le réseau d'eaux usées. Les rivières sont équipées de plusieurs stations qui mesurent la hauteur de l'eau toutes les 10 ou 15 min selon la station. Les stations pour la Chamberonne et la Mèbre aval appartiennent à la DGE et les données sont fournies directement sous forme de débits. Les données de débit allant du 01.01.2007 jusqu'à 01.04.2014 avec un pas de temps d'une heure ont été utilisées. Des données avec un pas de temps de 10 min ont été utilisées pour simuler la crue de 2008. Pour le modèle de prévision de débit, les mesures de débits sont récupérées en temps réel depuis la Vieille Hydrologique Vaudoise⁴

Les données des stations du Chatelard, Sorge et Mèbre amont proviennent du labo ECHO à l'EPFL. Plusieurs campagnes d'estimation de débit ont été faites pour déterminer la courbe de tarage Hauteur d'eau - Débit (Stadler P., 2013). La majorité des estimations a été faite au moulinet qui calcule la

⁴ <http://www.vhv.ch/>

vitesse moyenne pour chaque partie du profil de la rivière à différentes hauteurs. Le débit est obtenu en additionnant le débit de chaque partie, calculé en multipliant la vitesse mesurée par la surface de chaque partie.

L'autre méthode utilisée est le salinomadd (estimation du débit à partir de la dissolution d'une solution de sel.) Toutefois, les résultats ne sont pas cohérents en comparaison de ceux obtenus au moulinet. A partir de ces mesures, il a fallu interpoler et extrapoler pour obtenir la courbe de tarage. Pour l'interpolation, la méthode qui a obtenu les meilleurs résultats est la loi parabolique de forme:

$$Q = b_1 \cdot x^2 + b_2 \cdot x + b_3$$

Pour extrapoler les petits débits la loi exponentielle a été utilisée:

$$Q = b_1 \cdot \exp(b_2 \cdot x)$$

La courbe de tarage de Chaterlard (figure 11) a été estimée à partir de 19 jaugeages. La station se trouve à la sortie d'un voûtage (annexe D), ainsi le profil reste stable. Le débit maximum mesuré est de 0.74 [m3/s] pour un niveau d'eau de 0.48 [m]. Les données utilisées débutent le 30.04.2012 et se terminent le 14.05.2014.

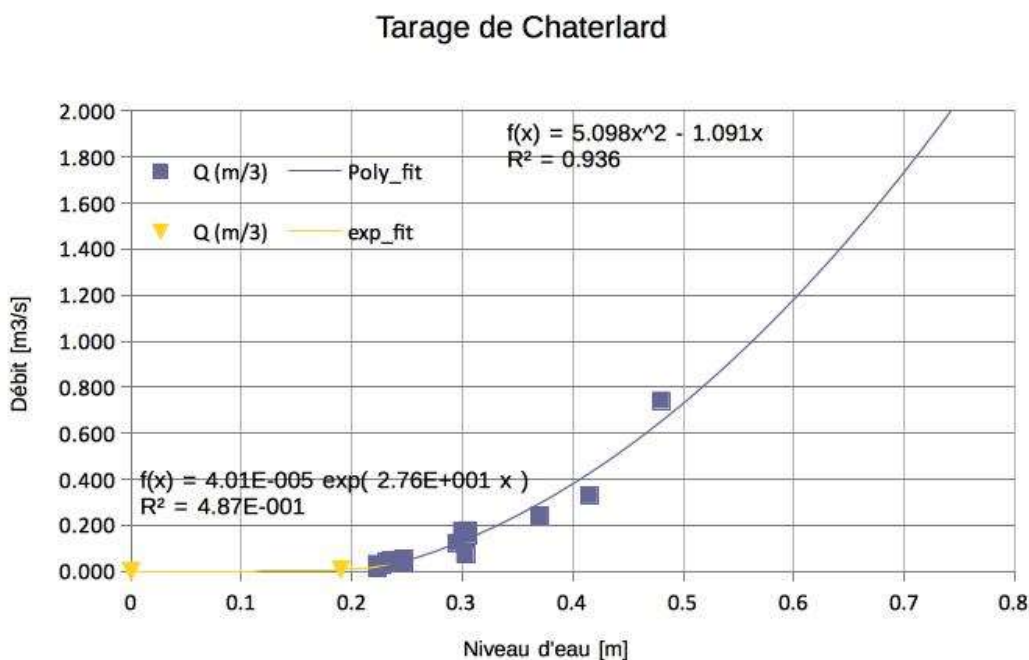


Figure 11: Courbe de tarage pour la station Chaterlard

Sur la figure 12 est présenté la courbe de tarage obtenu pour la station de Mèbre amont. La station se trouve sous une passerelle où le tronçon est bétonné (voir annexe D). La courbe a été construite à l'aide de 11 jaugeages. Le débit maximum mesuré est de 1.6 [m3/s] pour une hauteur d'eau de 0.34 [m]. Les données couvrent la période du 27.04.2012 au 08.04.2014.

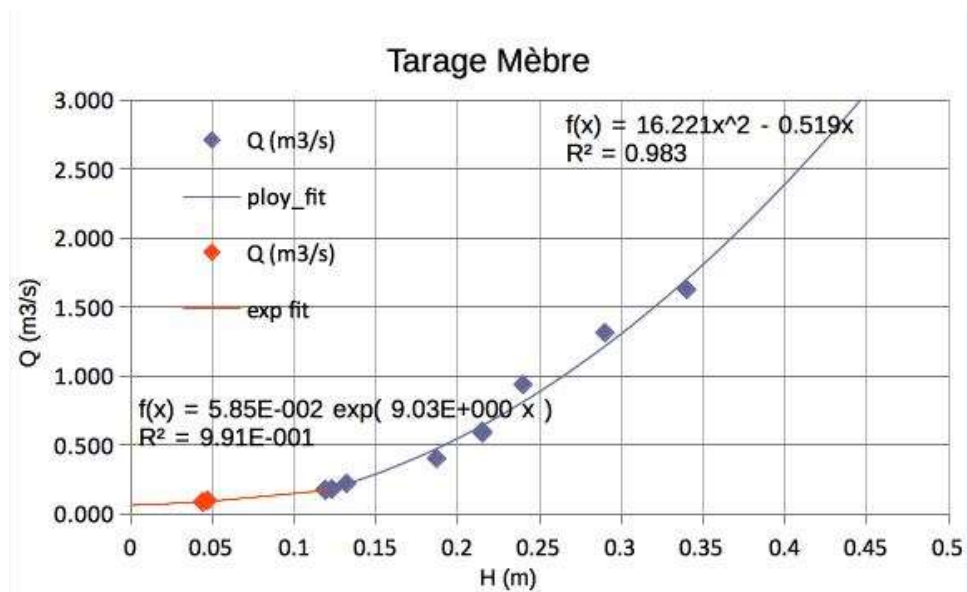


Figure 12: Courbe de tarage pour la station de Mèbre amont

La courbe de tarage pour la station de Sorge (figure 13) a été estimée à partir de 7 jaugeages. La station se situe sur un tronçon naturel (voir annexe). Ainsi, le profil de la rivière n'est pas figé comme les autres stations ce qui risque de tronquer la courbe de tarage avec le temps. Le débit maximum mesuré est de 0.83 [m³/s] pour une hauteur de 0.66 [m]. Les données utilisées couvrent l'année 2010, puis de 01.01.2012 jusqu'au 14.05.2014.

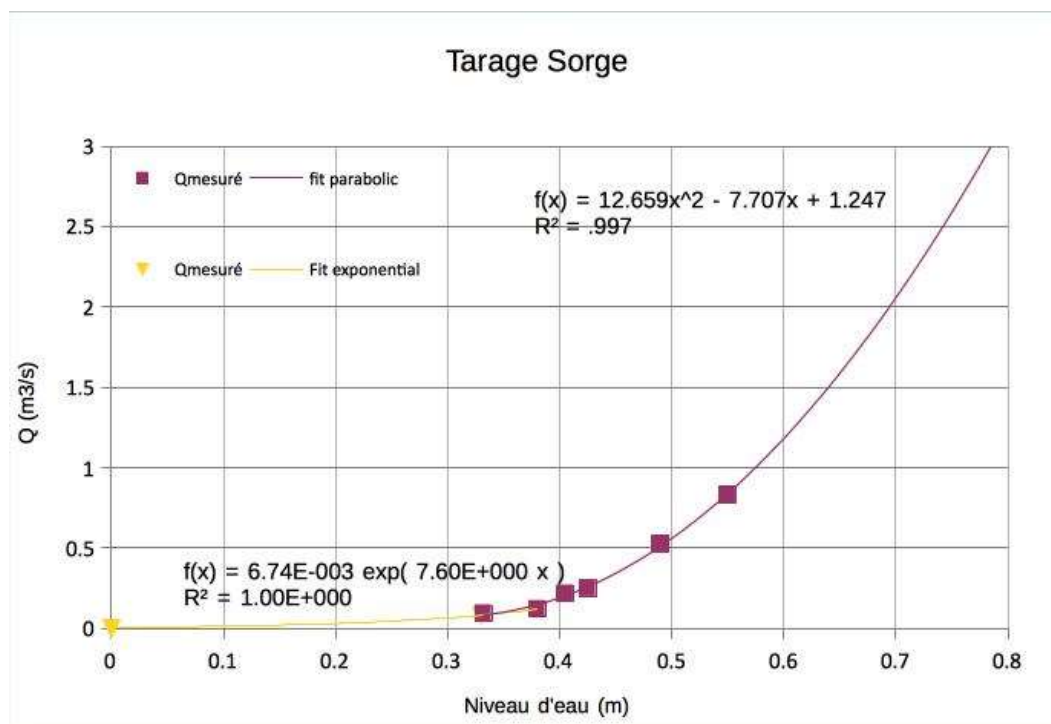


Figure 13: Courbe de tarage pour la station de Sorge

2. Campagne de mesure de débit sur le réseau d'eaux usées

Le bureau RIBI vient de réaliser une campagne de mesure de hauteur d'eau dans deux déversoirs d'orage à l'aide de sondes, afin de vérifier le bon fonctionnement des déversoirs DO 330 et DO 11-12. Les débits sont estimés à partir de la formule de Manning-Strickler. Les hypothèses de calcul sont synthétisées à la table 9. Le profil de l'emplacement des sondes a été calculé pour déterminer le rayon hydraulique.

La sonde du déversoir DO 330 a mesuré la hauteur d'eau à l'entrée de l'ouvrage. Les mesures ont été relevées du 19.12.2013 au 17.04.2014.

La sonde du déversoir DO 11-12 a été placée à la sortie de l'ouvrage mesurant ainsi la hauteur d'eaux usées continuant dans le réseau d'eaux usées. Les mesures ont été relevées du 26.12.2013 au 02.04.2014.

Déversoirs	Pente [m/m]	Rayon de la canalisation [cm]	Rugosité [m ^{1/3} /s]
DO11-12	0.0044	50	50
DO330	0.0037	75	66

Table 9: Hypothèse de calcul pour l'estimation de débit des eaux usées réalisé par le bureau RIBI

C. Génération des eaux usées

La consommation d'eau est générée pour chaque sous-bassin versant urbain en fonction du nombre d'équivalent habitant et de leur consommation moyenne journalière. Afin de reproduire le cycle de consommation d'eau durant la journée, la semaine et l'année - 24 coefficients journaliers, 7 coefficients hebdomadaires et 12 coefficients mensuels sont utilisés. Ces coefficients ont été estimés pour la région de Lausanne Est en 2005 par le bureau e-dric (Martinerie, 2010).

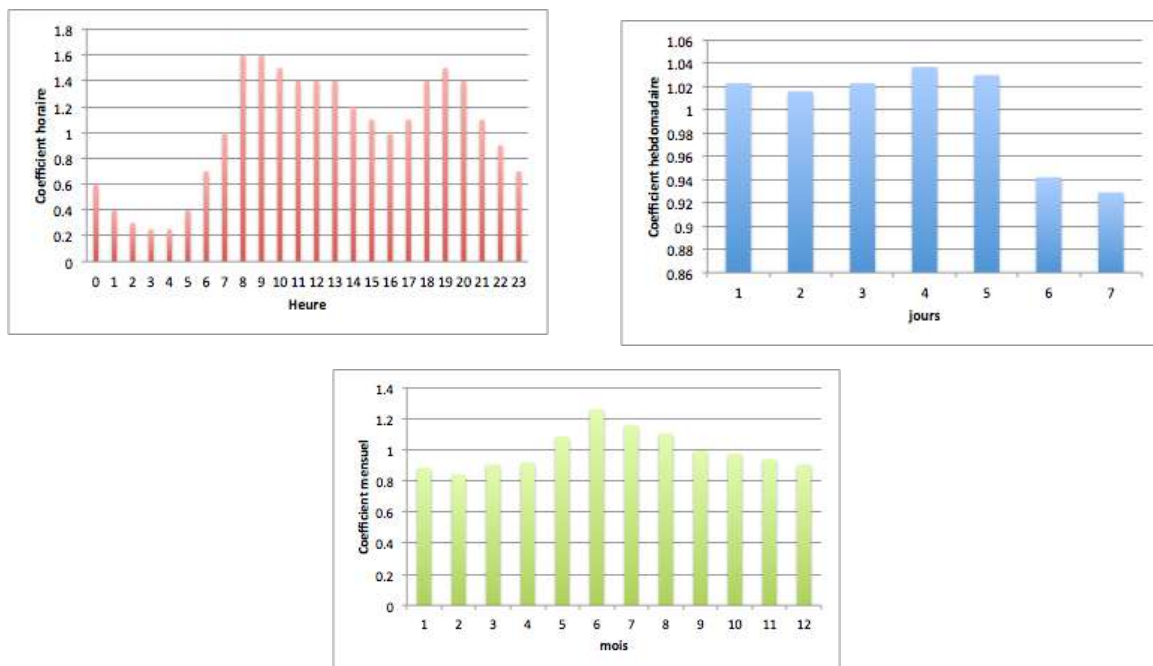


Figure 14: Coefficient de consommation d'eau aux échelles journalières, hebdomadaires et mensuelles pour Lausanne

D. Pompage d'eau par l'EPFL et l'UNIL

Les deux hautes-écoles situées à Ecublens, EPFL et UNIL, pompent l'eau du lac Léman à une profondeur de 69 m où la température est à 6°C environ toute l'année. Une partie de l'eau pompée est utilisée pour le refroidissement de processus (d'expérience) scientifique et la climatisation des bâtiments. L'autre partie est utilisée pour le chauffage par deux thermopompes d'une capacité de 260 l/s chacune.

L'eau pompée, appelée eau industrielle, est rejetée principalement dans la Mèbre, mais également dans la Sorge, la Chamberonne et dans le lac directement. La carte ci-dessous indique l'emplacement de ces rejets.

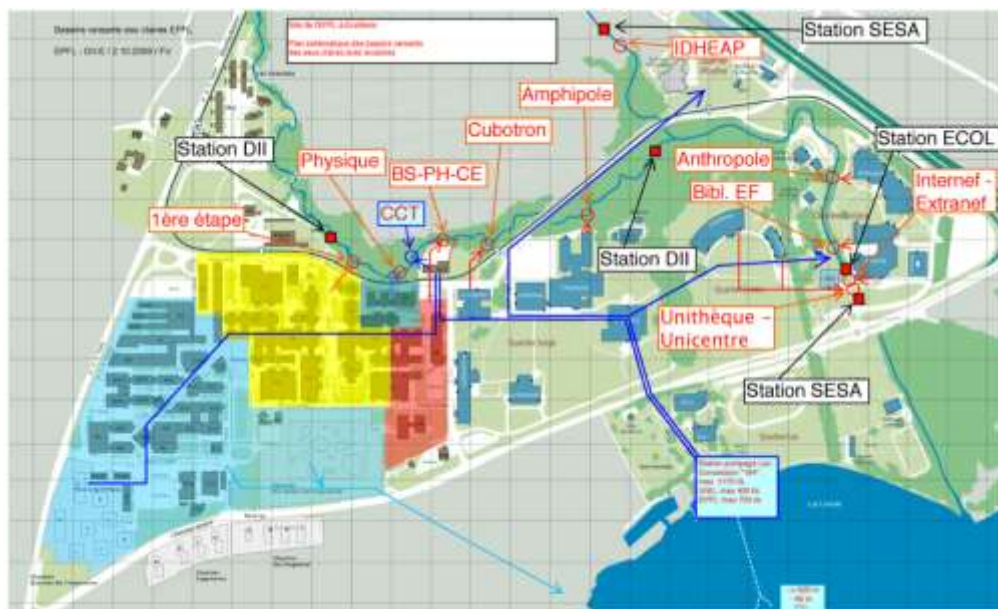


Figure 15: carte des rejets de pompage de l'EPFL et l'UNIL (source: Sidler, 2012)

En utilisant le débit total du pompage à l'EPFL, c'est-à-dire l'eau industrielle et l'eau des thermopompes, pour la période du 30.06.2011 au 31.01.2013, il a été possible de retrouver une relation entre la température de l'air mesuré à l'EPFL et le débit du pompage. Les données ont été adaptées sur Matlab ⁵ à l'aide de l'outil Curve Fitting.

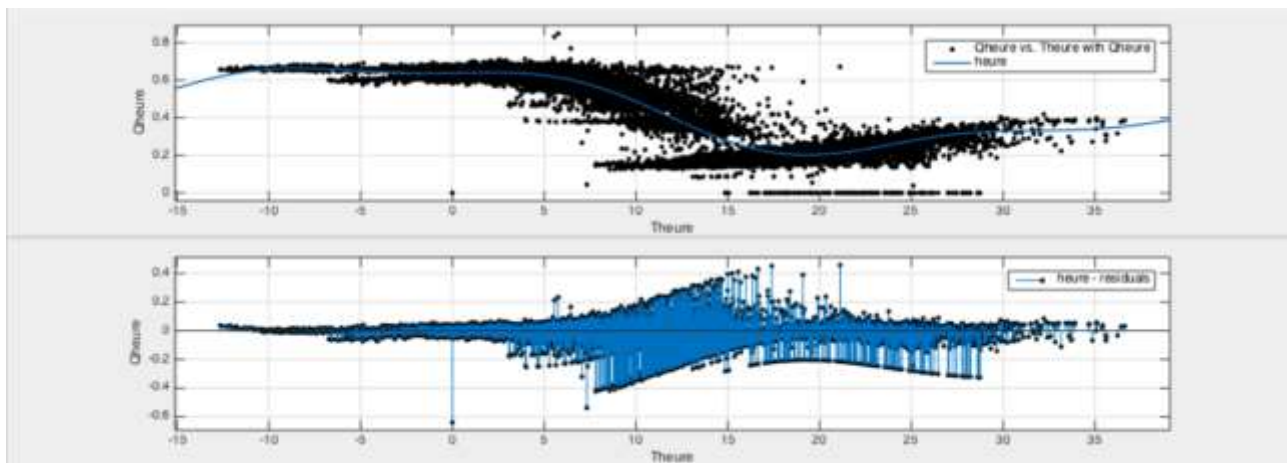


Figure 16: Fitting des données météorologiques avec curvefitting

$$Q(T) = 1.395 \cdot \sin(0.0046 \cdot T + 2.762) + 0.161 \cdot \sin(0.146 \cdot T - 4.571) + 0.051 \cdot \sin(0.324 \cdot T - 0.86)$$

avec Q : débit total pompé [m^3/s]
 T : température de l'air [$^{\circ}\text{C}$]

L'estimation est adéquate, mais loin d'être parfaite. L'indicateur R^2 indique le pourcentage de variation des données expliqué en fonction de la moyenne. Il varie entre 0 et 1. Avec la fonction sinusoïdale, 84% de la variation est expliquée. L'indicateur « Sum of Squares due to Error » (SSE) mesure la déviation totale entre la valeur estimée et la valeur observée. Il a été mesuré à 26.25. Une valeur proche de 0 signifie que l'estimation a une faible marge d'erreur. Dans notre cas la déviation est élevée, surtout pour le débit estimé avec des températures entre 5°C et 20°C . Pour obtenir une meilleure estimation du débit il faudrait utiliser d'autres paramètres qu'uniquement la température. Cependant, la tendance est respectée et il est possible de prédire approximativement le débit rejeté dans les rivières. Pour la suite du projet, les données sur le volume pompé par l'EPFL et l'UNIL seront transmises en temps réel.

⁵ <http://www.mathworks.fr/products/matlab/>

IV. Modèle hydrologique

Il est de plus en plus courant d'utiliser des modèles de simulation pour les domaines de l'hydrologie et de l'hydraulique pour la conception d'ouvrages de protection contre les crues, de gérer en temps réel les installations hydrauliques ou encore d'étudier le comportement d'un bassin versant lors du transport de sédiment ou de la dilution de polluants. Les modèles permettent de gérer la complexité du comportement et des interactions entre les cours d'eau et les infrastructures hydrauliques.

Il existe de nombreux modèles hydrologiques et hydrauliques permettant de simuler les différents aspects de complexité. Pour choisir le programme à utiliser il est important de se poser quelques questions: quel est l'objectif de l'étude? Quelle est la complexité et la taille du système étudié? Quelles sont les données disponibles? Est-ce que le modèle est reconnu comme efficace? Est-ce que le modèle va être adopté pour des projets futurs?

Il existe une grande variété de modèle tel que le Storm Water Management Model⁶ qui permet d'étudier la qualité et la quantité des eaux de ruissellement le long d'un bassin versant, le modèle MOUSE⁷ qui permet d'étudier avec beaucoup de précision les réseaux d'eaux usées urbains ou encore le modèle Rebeka⁸ qui prédit l'impact des eaux urbaines sur les récepteurs d'eau naturel. Le modèle choisi pour cette étude est le Routing System 3.0⁹, un modèle d'objet orienté permettant d'avoir une vue d'ensemble sur les écoulements dans un bassin versant.

A. Routing System 3.0

1. Introduction

Routing System 3.0 développé par le bureau e-dric est une amélioration du programme d'objet orienté Routing System. Il a été développé par Jérôme Dubois au Laboratoire de Construction Hydraulique (LCH) à l'EPFL (Jordan F. et al., 2012). Il a été élaboré pour simuler les écoulements de surface à partir de simulation de précipitation-ruissellement et également de routage de débit. Il est basé sur un schéma semi-distribué qui permet de simplifier un bassin-versant en plusieurs sous-bassins. Plusieurs processus hydrologiques ont été inclus comme la fonte des neiges, les écoulements de surface et souterrains ainsi que des éléments hydrauliques de contrôle (pompage, turbinage, dérivation, jonction et réservoir).

Le programme est codé en Visual Basic .Net 2008 et adapté en programme orienté objet. Chaque fonction hydrologique/hydraulique est représentée par un « icône » qui peut être associé manuellement, ce qui permet une prise en main rapide.

Initialement développé pour simuler des événements de crues pour des systèmes complexes composés de plusieurs sous-bassins versants, des jonctions, des ouvrages de rétention, par la suite de nouvelles fonctionnalités ont été ajoutées : l'optimisation de production d'hydroélectricité, la prédiction en temps réel de crue, l'impact de la fonte des glaciers, la simulation pour l'hydrologie urbaine et la propagation de la pollution. Finalement, plusieurs indicateurs permettent de caler les paramètres des différents objets.

⁶ <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/wq/models/swmm/>

⁷ <http://mikebydhi.com/Products/Cities/MIKEURBAN.aspx>

⁸ http://www.rebeka.ch/en/det_sim.html

⁹ <http://e-dric.ch/index.php/fr/software-fr/the-rs-2012-tool-fr>

2. Outils utilisés pour le projet

Les outils utilisés sous RS 3.0 (Jordan et al., 2012) sont rapidement décrits dans cette partie.

a) Station météo virtuel



L'objet station météo virtuel permet d'estimer la distribution spatiale des variables météorologiques (précipitation, température et ETP) à partir de mesures spatiales.

La méthode utilisée pour estimer la distribution spatiale des paramètres météorologiques est celle de Shepard. Pour déterminer les variables pour un sous-bassin versant, on utilise une pondération de la distance au carré inverse entre le centre de gravité de celui-ci et les stations de mesures qui se situent dans un rayon défini:

$$d_{i,s} = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2}$$

$$X_s = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot \frac{1}{d_{i,s}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,s}^2}}$$

avec x_i, y_i : position de la station i dans la base de données [m]; x_s, y_s : position de la station virtuelle s [m]; X_s : valeur de la variable à estimer [°C ou mm/h]; X_i : valeur de la variable à la station i dans la base de données [°C ou mm/h]; $d_{i,s}$: distance entre la station i de la base de données et la station virtuelle [m].

Un gradient d'altitude a été ajouté à la méthode pour prendre en compte les variations météorologiques en fonction de l'altitude.

L'évapotranspiration est calculée selon la méthode de Turc. L'estimation ne nécessite que des données de température:

$$ETP = \frac{K \cdot T}{T + 15} \cdot (Rg + 50) \text{ if } T > 0$$
$$ETP = 0 \text{ if } T \leq 0$$

avec ETP : évapotranspiration potentiel [mm/mois]; T : température de l'air [°C]; Rg : radiation globale [kWh/m²/day]; K : constante [-].

$$K = 0.4 \text{ si } \text{mois} \neq \text{February}$$

$$K = 0.37 \text{ si } \text{mois} = \text{February}$$

b) Modèle Snow-GSM



Le modèle Snow-GSM est composé de deux sous-modèles qui simulent l'évolution du manteau neigeux (accumulation et fonte) en fonction de la température et des précipitations ce qui donne la variable de précipitation équivalente (Peq) qui peut être utilisée comme variable d'entrée pour l'infiltration.

Les paramètres à régler pour la simulation sont: le coefficient An de fonte de neige en degré par jour (mm/°C/jour), θ_{cri} correspond à la teneur critique en eau du manteau neigeux et le coefficient bp (s/m) de fonte dû à la pluie.

c) **Modèle infiltration (GR3)**



A partir des précipitations (ou précipitation équivalente provenant de la fonte de neige) et le potentiel d'évapotranspiration (ETP) on calcule l'infiltration de l'eau dans le sol. Le sol est modélisé par deux réservoirs: le réservoir intermédiaire représentant la couche supérieur du sol de 0.1 à 2 m et le réservoir de base généralement équivalent à 20% de la hauteur du réservoir intermédiaire. Ils sont caractérisés par une hauteur maximale, un coefficient d'évacuation de l'infiltration ainsi qu'un coefficient de transfert entre les deux réservoirs. La variation de la vitesse d'infiltration peut être modifiée à l'aide du coefficient a_{inf} , et la variation de la vitesse d'évacuation des réservoir peut être modifiée à l'aide des coefficients $ak_{interflow}$ et $ak_{baseflow}$. Lorsque la hauteur de l'eau dans le réservoir intermédiaire atteint la hauteur maximale, l'eau ruissèle à la surface (voir partie modèle SWMM). La description des différents processus est dans le guide RS 3.0 (Jordan et al., 2012).

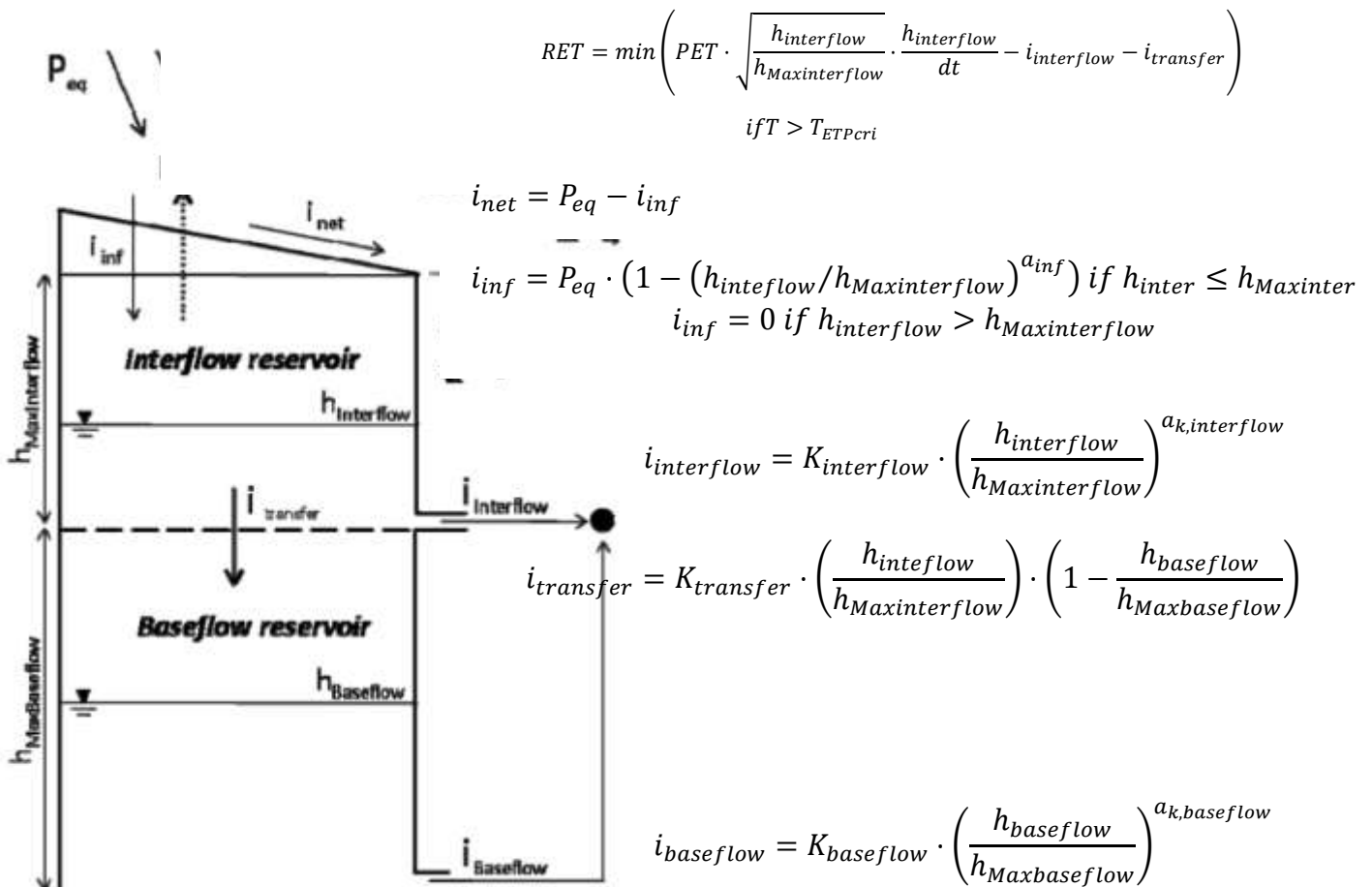


Figure 17: Schéma du fonctionnement de GR3 (source: Jordan et al., 2012)

d) **modèle Runoff (SWMM)**



Le débit, provenant du ruissellement sur les surfaces imperméables ou lorsque le réservoir du sol est plein, est calculé à l'aide de l'équation de Manning-Strickler.

Le paramètre à ajuster est le coefficient strickler, K_s . La pente, la longueur moyenne de ruissellement et la surface sont considérées comme constants.

e) **Bassin urbain**



Pour l'hydrologie urbaine, il existe deux sources d'eau: les précipitations et la consommation d'eau (foyer, industrie et agriculture). De ce fait il faut faire une distinction entre les eaux claires et les eaux usées.

Le volume d'eaux usées est déterminé par le nombre d'équivalent habitant raccordé au réseau d'eaux usées et leur consommation horaire.

Pour reproduire le ruissellement des pluies dans un bassin urbain, le bassin est séparé en zones perméables et imperméables définies par un pourcentage de la surface. Cela permet une réponse hydrologique rapide pour la zone imperméable et une réponse plus lente par infiltration pour la zone perméable.

Pour évaluer la partie des eaux de ruissellement qui finissent dans le réseau d'eaux usées ou dans la nature il faut faire la différence entre un réseau d'égout séparatif, semi-séparatif ou combiné. Ce qui se fait avec le pourcentage de séparation des eaux.

L'objet bassin urbain donne la possibilité d'établir le pourcentage d'infiltration d'eau claire dans le collecteur d'eaux usées dû à une mauvaise connexion de tuyau ou un tuyau en mauvais état.

f) *Réservoir pollutif*



Cet objet permet de simuler un bassin de rétention en zone urbaine. Le volume d'eau retenu dans le réservoir dépend de la différence entre le débit entrant et sortant. Un réservoir est généralement associé à des déversoirs, des turbines ou des pompes qui dépendent du niveau d'eau dans le réservoir. Ainsi, pour déterminer le débit sortant il faut connaître la relation entre le niveau d'eau et le volume.

g) *Déversoir pollutif*



Comme il est dit ci-dessus, un déversoir est connecté à un réservoir et le débit sortant est déterminé par la hauteur d'eau. Donc il faut définir la relation entre le niveau de l'eau et le débit. L'objet est utilisé pour une simulation concernant l'orifice de contrôle et le déversement de contrôle d'un bassin de rétention.

h) *Diversión pollutive*



L'objet diversion permet de séparer le débit d'avec la relation entre le débit entrant et le débit dévié. Il est utilisé pour simuler les déversoirs d'orage installés le long du réseau d'eaux usées.

i) *Outil de prévision du débit*

Le bureau e-dric a amélioré le programme RS 3.0 pour pouvoir l'utiliser comme un outil opérationnel de prédiction de débit. Une interface graphique a été faite sur « www.swissrivers.ch » permettant de suivre les prévisions et les mesures de débit le long d'une rivière, ainsi que le fonctionnement des différentes infrastructures. Un système d'alarme peut être mis en place pour avertir lorsqu'il y a danger.

3. Structure du modèle

Pour réaliser la structure du modèle d'un bassin versant, le découpage fait par e-dric (Rémi Martinerie, 2010) a été réutilisé. L'objet bassin versant urbain a été employé pour mettre en évidence les sous-bassins versants. Les paramètres estimés dans l'étude ont été adaptés, entre autres ceux du nombre d'équivalent habitant et du taux de séparatif.

Les déversoirs d'orage sont simulés par une diversion pollutive (voir figure 18). La relation entre débit entrant et débit déversé a été calculée par le bureau e-dric.

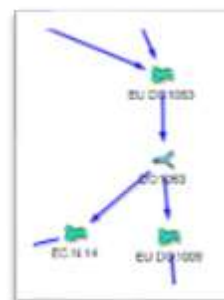


Figure 18: Exemple de simulation de déversoir utilisé pour le modèle hydrologique

Les bassins de rétention sont reproduits en utilisant un réservoir, un déversoir représentant l'orifice et un autre représentant le déversoir sur la crête (voir figure 19). Chacun de ces objets est de type « pollutif » afin de garder les informations sur la quantité d'eaux usées, d'eaux de ruissellements et de matière en suspension dans les cours d'eau.

La quantité d'eau pompée par l'EPFL a pu être reproduite avec la relation sinusoïdale entre la

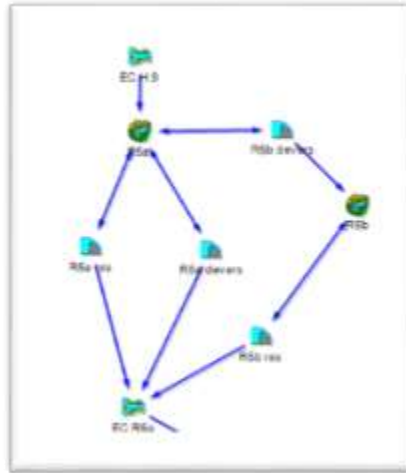


Figure 19: Exemple de simulation du bassin de rétention utilisé pour le modèle de la Chamberonne

température de l'air et le débit pompé qui avait été calculé préalablement (voir partie II.D). Ainsi, le pompage a pu être modélisé en utilisant une station météo virtuelle calculant la température de l'air relié à une diversion, ceci fait le lien entre la température pour le débit entrant et le débit pompé pour le débit dévié (voir figure 20).

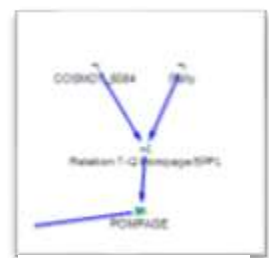


Figure 20: Simulation du pompage à partir des températures de Pully

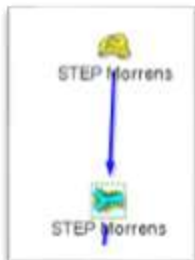


Figure 21: Simulation des rejets d'eau « propre » de STEP

Les eaux claires parasites sont définies comme une source constante pendant toute l'année. Elles ont été comptabilisées avant le déversoir DO330 pour la Sorge et à la fin du récepteur de la Mère.

Finalement, les rejets des STEP en amont du bassin versant ont été reproduits en connectant le rejet d'eaux usées de bassins versants fictifs contenant un nombre d'équivalent habitant raccordé à chaque STEP (voir figure 21). Pour simplifier le modèle, l'eau rejetée par les STEP est considérée comme « propre ». Ainsi, les eaux usées sont transformées en débit d'eau claire en raccordant le rejet des eaux usées à une jonction simple.

V. Résultat

A. Calage

Le débit résultant des pluies pour les bassins versants est régi par plusieurs paramètres. Les paramètres principaux pour le calage étant:

- Zone imperméable

Pour les zones imperméables, la rugosité, exprimé par le coefficient de Strickler (K_s) permet de régler la vitesse des écoulements de surface. Cela se traduit par l'amplitude des pics de débit. Un coefficient élevé traduit une haute vitesse de ruissellement. Les valeurs standard pour un bassin versant urbain se situe plus vers $K_s = 6$ ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$), pour un bassin versant rurale, le coefficient de rugosité est plus faible, $K_s = 3$ ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)

- Zone perméable

Les zones perméables contribuent au débit par restitution de l'infiltration. Les paramètres importants sont: la vitesse d'infiltration (K_{GR3}), la hauteur du réservoir intermédiaire ($h_{GR3\max}$), la vitesse d'infiltration vers le réservoir profond (K_{lent}) et la hauteur de ce réservoir ($h_{\text{lent}\max}$) qui correspond environ à 20% de la hauteur du réservoir intermédiaire. La variation de la vitesse de restitution de l'eau du réservoir intermédiaire, du réservoir profond et la variation de la vitesse d'infiltration peuvent être modifiées à l'aide des paramètres a_K ($a_{\text{intermédiaire}}$, a_{lent} et a_{inf}) qui varie entre 1 et 6. Lorsque un réservoir a une faible hauteur, sa capacité de rétention est rapidement saturée, et l'eau se met à ruisseler, cela provoque des pics de débit dans la rivière.

D'autres paramètres influencent le débit des bassins versant comme le taux d'imperméabilité du sol et le taux de séparatif de l'eau usée et de l'eau de ruissellement dans les zones urbaines. Ces paramètres ont été estimés au début et n'ont pas été modifiés par la suite.

Les paramètres régulant la fonte des neiges sont fixés également. Le paramètre An correspondant à la vitesse de la fonte du manteau neigeux en fonction de la température a été fixé à 0.5 [$\text{mm}/^\circ\text{C}/\text{jour}$] et le coefficient de fonte par précipitation liquide (bp) est fixé à 0.0125 . Le coefficient An choisi est très faible car une fonte trop rapide provoque des variations de débit non observées aux stations de contrôle. Ainsi, en définissant un coefficient bas, l'effet de la fonte de neige est atténué. Le coefficient d'évapotranspiration permet d'ajuster le taux d'évaporation. Il est fixé en général à une valeur de 2.

Pour évaluer la qualité du calage, RS calcule plusieurs coefficients. Le plus utiles sont le coefficient Nash-Sutcliffe et le Bilan de volume:

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{simulation},i} - Q_{\text{obs},i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{simulation},i} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2}$$

$$Bilan = \frac{V_{\text{simulé}}}{V_{\text{obs}}}$$

avec $Q_{\text{simulé},i}$: Débit simulé au temps i [m^3/s]
 Q_{obs} : débit mesuré au temps i [m^3/s]
 $V_{\text{simulé}}$: volume simulé sur l'ensemble de la simulation [m^3]
 V_{obs} : Volume mesuré sur l'ensemble de la simulation [m^3]

Le coefficient de Nash reflète la qualité de la simulation pour chaque pas de temps calculé. Un coefficient de 1 correspond à une simulation exactement similaire aux observations, si le coefficient vaut 0, cela signifie que la moyenne des observations correspond à la simulation et si il est négatif, la moyenne est meilleure que la simulation. Toutefois, la simulation peut reproduire correctement les observations mais être légèrement déphasé, donc le coefficient de Nash sera médiocre.

Un bilan de volume de 1 signifie que le volume simulé correspond au volume observé. En combinant ces deux paramètres on obtient une bonne évaluation de la simulation.

B. Calage pour la période du 01.10.2012 au 01.10.2013

1. Calage des paramètres hydrologiques

Pour le calage des paramètres du modèle hydrologique, le bassin versant a été séparé en cinq zones en fonction des stations limnimétriques (voir figure 22). La période de calage utilisé est du 01.10.2012 au 31.03.2014. Pour les simulations en hydrologie, la date de départ est souvent le 1er octobre, car on estime que les réserves d'eau dans le sol sont vides. Il a fallu choisir un pas de temps très court pour les calculs pour éviter des problèmes de divergence au niveau des bassins de rétention. Ainsi, il a été choisi de faire un calcul toutes les 30 s.

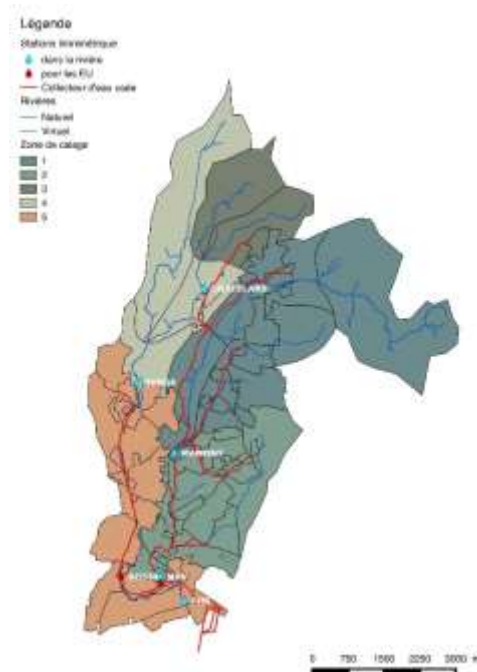


Figure 22: Carte des zones de calage pour le modèle hydrologique du bassin versant

Pour chaque zone un récapitulatif a été fait avec les paramètres choisis et le résultat de la simulation. Les zones 1,3 et 4 sont majoritairement rurales, alors que les zones 3 et 5 sont des zones urbaines.

Les Figures 23 à 27 représentent les hydrogrammes mesurés et simulés aux cinq stations limnimétriques.

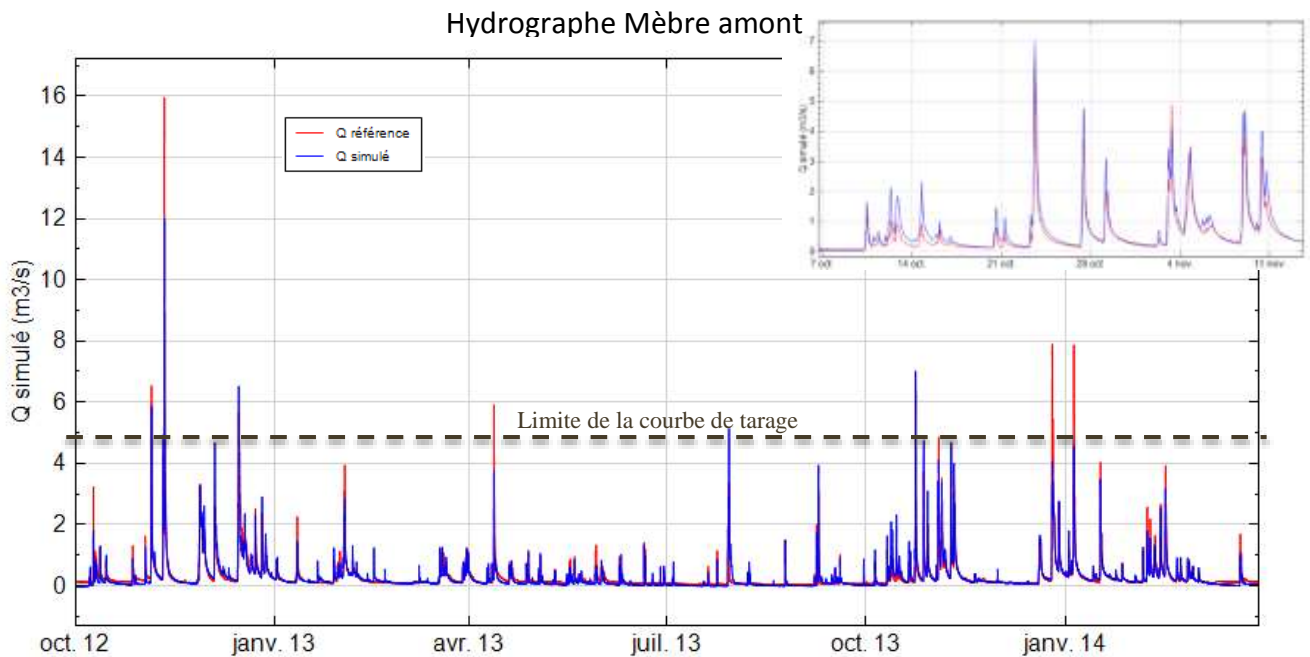


Figure 23: Résultat du calage pour la station de Mèbre amont pour l'année 2013

La simulation de Mèbre amont (figure 23) reproduit bien la réponse hydrologique. L'image dans le coin supérieur de droite de la figure 23 est un zoom sur les mois d'automne. Le coefficient de Nash atteint 0.86 et le bilan de volume 0.96. Les pics de débit sont sous-estimés. Plusieurs raisons peuvent en être la cause. Il arrive que les pics soient causés par des pluies fortes très localisées qui n'ont pas été mesurées par les stations météorologiques comme c'est souvent le cas pour ce type d'événement. Une autre raison est la difficulté à simuler le comportement du sol pour des événements de pluie intense. L'objet GR3 simule l'infiltration de façon simplifiée en prenant en compte la hauteur d'eau contenu dans une colonne de sol en fonction de la hauteur d'eau maximal (Jordan F. et al., 2012). Finalement, les mesures de gros débits sont peu fiables dû à l'incertitude de la courbe de tarage au-dessus d'un débit de 1.6 [m³/s] (voir partie II.B.1.).

La simulation de la fonte de neige pour les mois d'hiver provoque des hausses de débit non observées. Le comportement du manteau neigeux en ville est difficile à reproduire car les températures durant l'hiver se situent souvent autour de 0°C qui est la limite pour la fonte. Il suffit que la température monte au-dessus de 0°C pour que la neige fonde entièrement. De plus, ne possédant pas de donnée pour la partie rurale, il se peut que la température soit légèrement surestimée. Un autre facteur d'erreur est que la neige est régulièrement évacuée du réseau routier et amassée sur les bords et se transforme en glace ce qui ralentit la fonte.

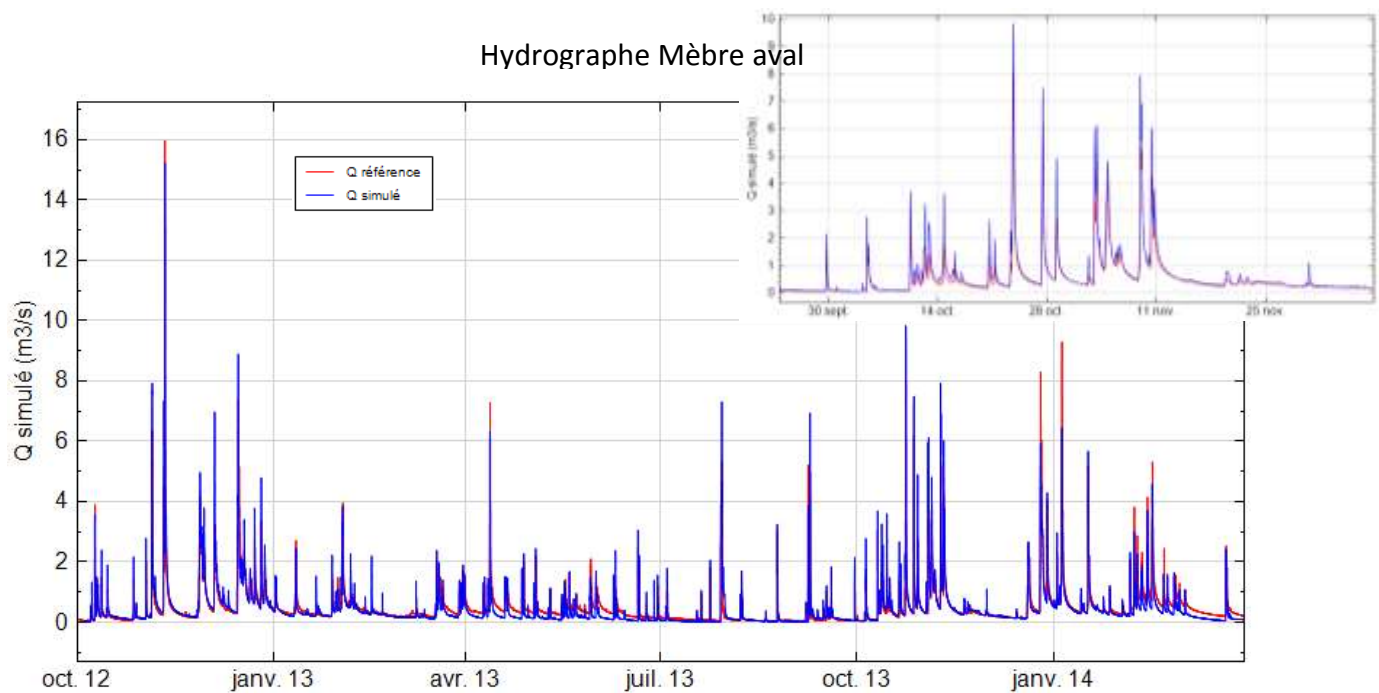


Figure 24: Résultat du calage pour la station de Mèbre aval pour l'année 2013

Les résultats de la simulation pour la zone de Mèbre aval (figure 24) obtiennent un Nash de 0.8 et un bilan de volume de 0.92. La réponse de l'hydrographe calculé suit les observations pour l'été et l'automne. En hiver, on retrouve les interférences dues à la fonte de la neige. Pour les mois de printemps, les pics de débits sont respectés, mais l'écoulement de l'eau provenant du sol semble sous-estimé. Il a fallu trouver un compromis entre la surestimation du débit sortant durant les mois d'automne et la sous-estimation du débit des mois de printemps. De plus, la zone de Mèbre aval est fortement urbanisée ce qui modifie le comportement hydrologique. En effet, le taux d'imperméabilisation joue un rôle majeur dans le comportement des réservoirs des sols.

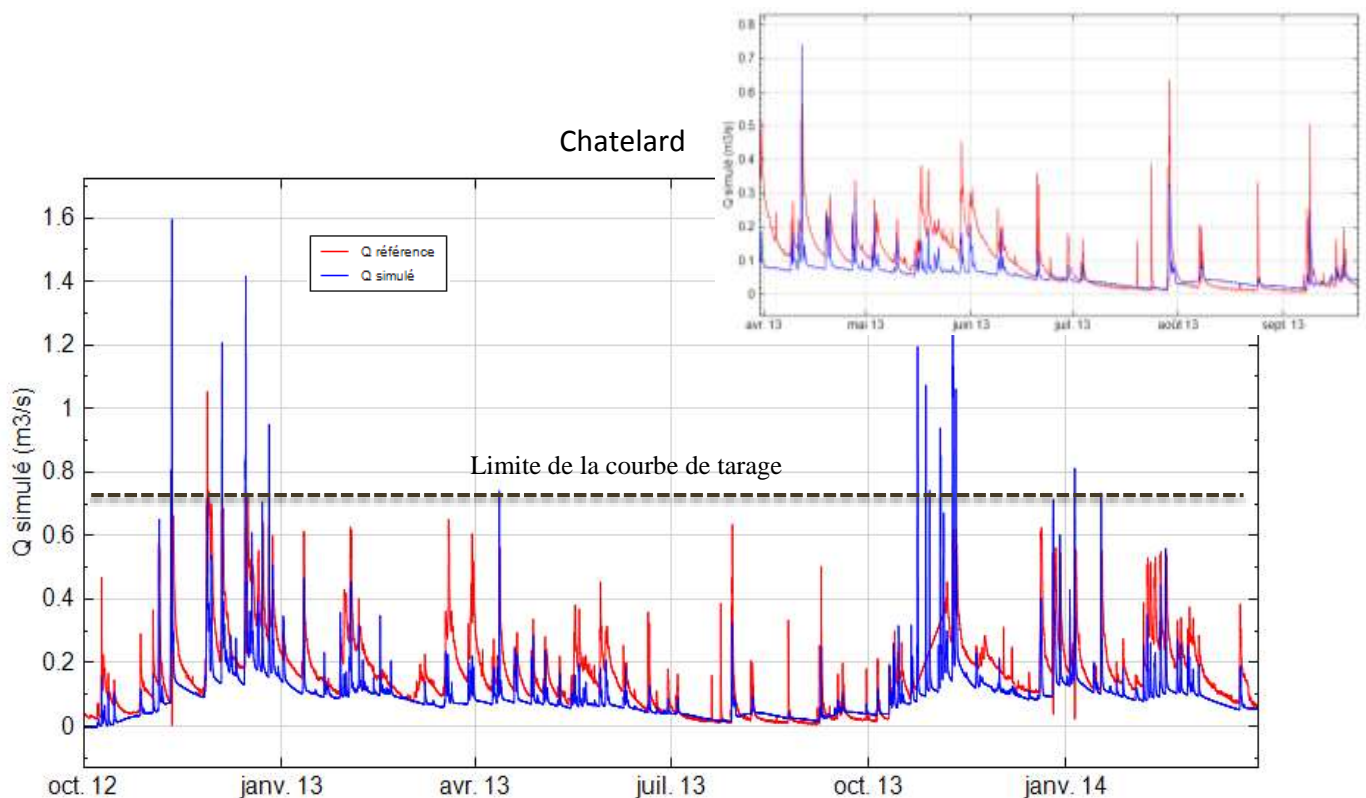


Figure 26: Résultat du calage pour la station de Chatelard pour l'année 2013

Les résultats de Chatelard (figure 25) reproduisent la même tendance mais ne sont pas optimaux, avec un Nash de 0.2 et un bilan de volume de 0.62. L'un des problèmes majeur pour cette station est le faible débit. Le débit moyen est de $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour des gros débits (environ $10 \text{ m}^3/\text{s}$), une différence de $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ n'a que peu d'influence sur les résultats, alors que cette différence est courante pour les ruisseaux ($0.5 \text{ m}^3/\text{s}$). Malgré tout, la simulation permet de reproduire le comportement hydrologique. Un effort doit être fait sur cette station pour améliorer la mieux connaître les débits sur le bas du bassin

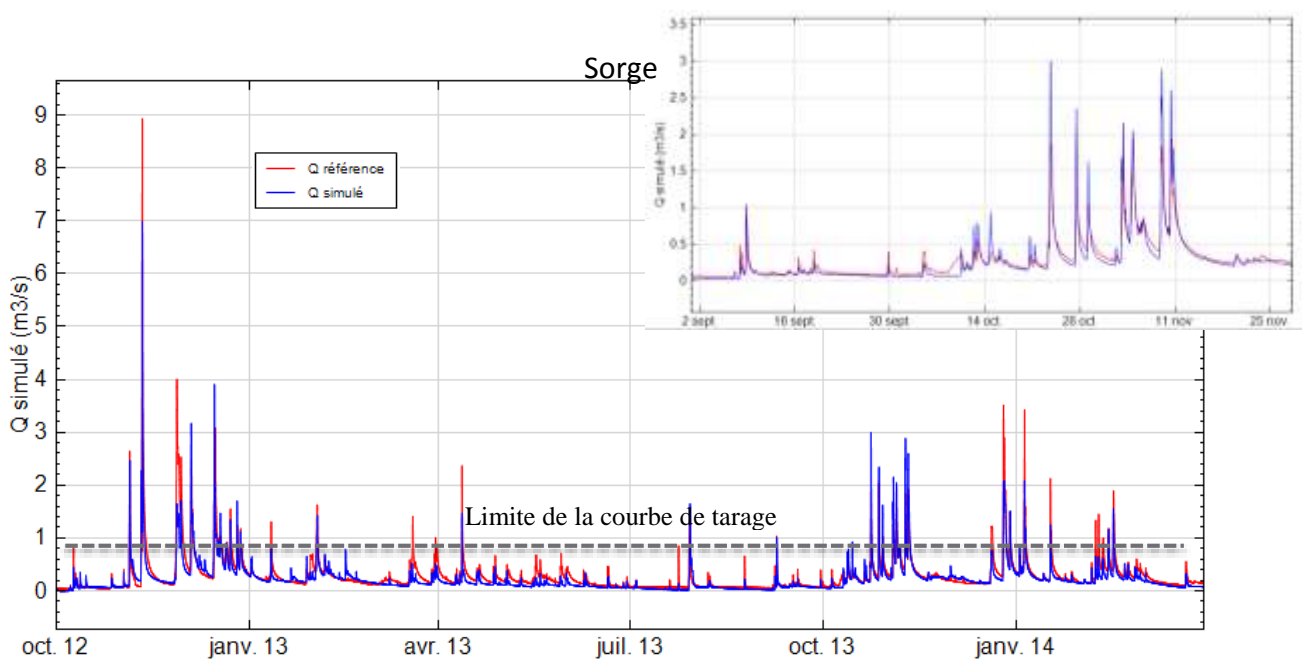


Figure 25: Résultat du calage à la station de Sorge pour l'année 2013

Pour les hydrographes de la Sorge (voir figure 26), le Nash atteint 0.79 et un bilan de volume de 0.97. La différence de volume peut être due à une sous-estimation des précipitations. Il est important de rappeler que pour cette station, le débit maximum mesuré pour la coube de tarage est de 0.84 [m³/s] et que le tronçon n'est pas bétonné. Ainsi, le calage des débits supérieurs à 0.84 [m³/s] est une approximation.

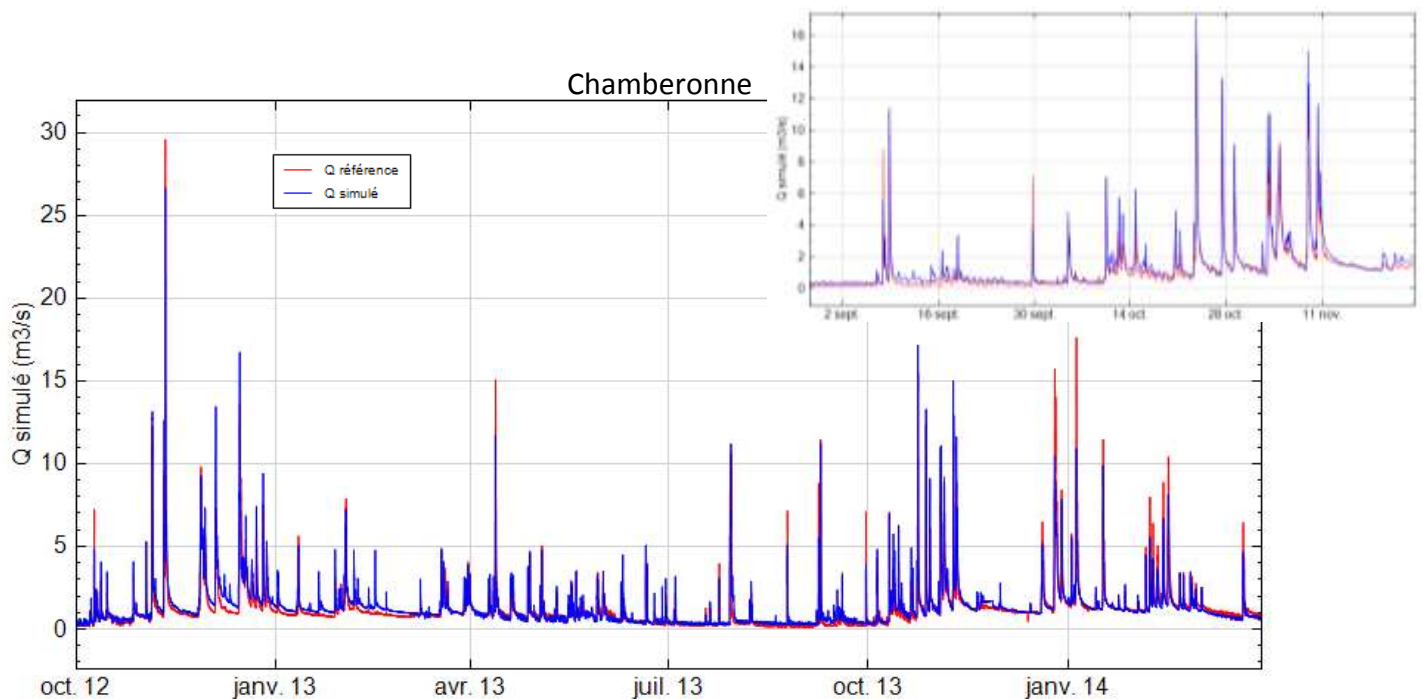


Figure 27: Résultat du calage pour la station Chameberonne pour l'année 2013

La simulation pour la Chamberonne (voir figure 27) obtient un Nash de 0.82 et un bilan de volume de 1.07. En observant le débit journalier, il démontre clairement la variation de débit provoqué par le rejet d'eau de pompage de l'EPFL. La relation entre la température de l'air et le rejet de l'eau de pompage (EPFL) (voir partie II.D) imite correctement le volume des rejets observé.

Pour terminer, le calage global du modèle hydrologique est bon. La moyenne pondérée de Nash par la surface de chaque zone de calage est de 0.76 et la moyenne pondérée du bilan de volume est de 0.94 (voir table 10). Les pics sont correctement reproduits. Toutefois, le comportement hydrologique en hiver n'est pas optimum. La station de Châtelard obtient des résultats insatisfaisants. Ces deux points méritent un travail plus approfondie pour une simulation plus précise.

Zones	Surface (ha)	Nash	Bilan volume
Mèbre amont	1429	0.86	0.96
Mèbre aval	674	0.8	0.92
Chatelard	405	0.2	0.62
Sorge	723	0.79	0.97
Chamberonne	774	0.82	1.07
Bassin versant	4006	0.76	0.94

Table 10: Synthèse des résultats du calage des zones avec la moyenne pondéré du coefficient de Nash et du bilan de volume, ainsi que la surface des chaque zone et du bassin versant

2. Calage de réseau d'eau usée

Une étude de la STEP de Vidy faite en novembre 2007 (Rémi Martinerie, 2010) a permis de déterminer le débit provenant du réseau Ouest-lausannois. Sachant que 77'059 habitants étaient raccordés au réseau à cette époque, la consommation moyenne par habitant était de 217 l/EH/jours. Le nombre d'habitant a augmenté à 77'382 selon le recensement fait en 2012. En 2005 le bureau RIBI SA a effectué des mesures ponctuelles sur le réseau. A partir de la répartition des habitants dans le bassin versant ainsi que l'amplitude et le volume mesuré, on a pu déterminer la consommation moyenne journalière par habitant pour les différents sous-bassins versants:

- 120 l/j/EH pour les BV de l'EPFL, de l'UNIL et de Chavannes
- 160 l/j/EH pour les BV d'Ecublens, Renens Est et Crissier Sud
- 200 l/j/EH pour les BV de Renens Ouest, Crissier Nord, Saint-Sulpice et les communes situées dans la partie amont du BV

Afin de valider la répartition, les données mesurées aux déversoirs DO330 et DO11-12 par le bureau RIBI SA ont été utilisées. A partir d'une première simulation, il a été possible de déterminer le volume d'eau claire parasite (ECP) en faisant une moyenne de la différence entre chaque mesure et la simulation pour les jours sans pluie.

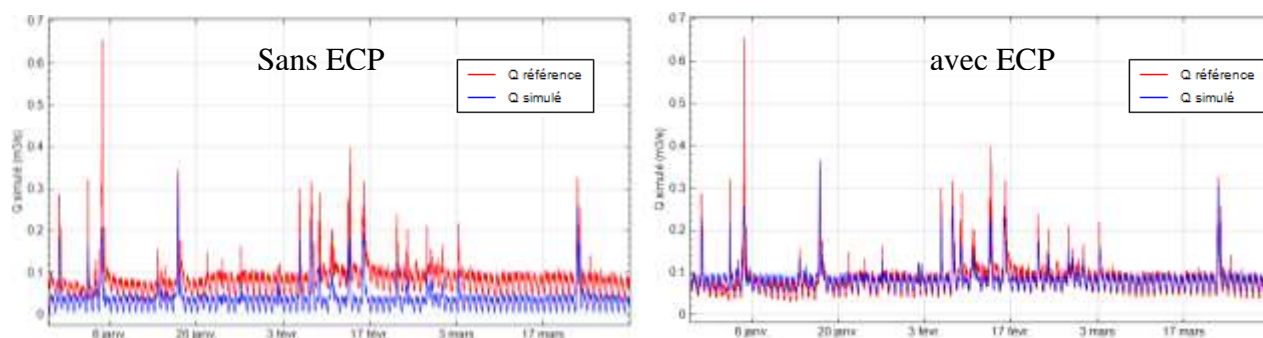


Figure 28: Calage des eaux claires parasites du déversoir DO330 pour les mois de janvier à mars 2014

Pour le DO 330, il a été estimé que le débit d'eau claire parasite s'élève à 41 l/s par temps sec (voir figure 28). Par temps de pluie, on observe une augmentation du débit dans le réseau d'eau usée ce qui est dû à un réseau d'égouts combiné. La simulation sous-estime ces pics. Le taux de séparation des eaux usées a été ajusté pour mieux reproduire le débit dans les égouts en faisant plusieurs essais sur les sous bassins versant urbanisés. On obtient un Nash de 0.66 avec un bilan de volume de 1.02.

La mauvaise qualité des mesures faite au DO11-12 rend la calibration du déversoir plus difficile (voir figure 29). Les mesures sont effectués par un capteur ultrason, et lorsque de la buée condense sur

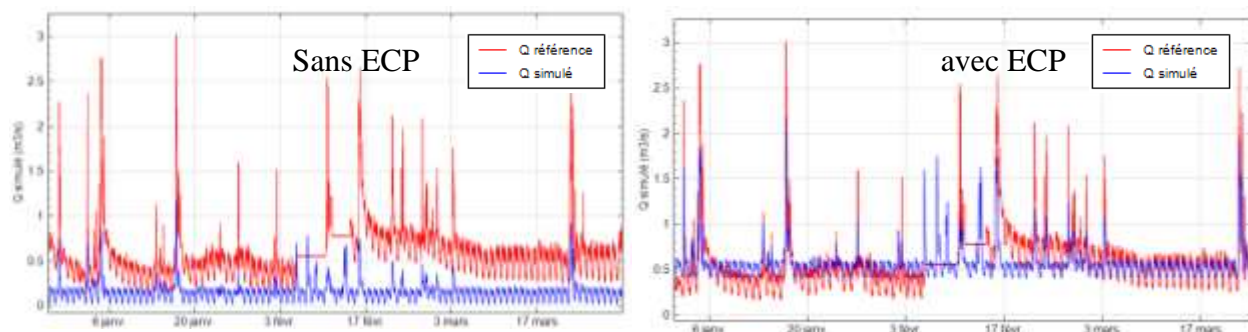


Figure 29: Calage des eaux claires parasites du déversoir DO11-12 pour les mois de janvier à mars 2014

l'appareil, les mesures sont perturbées. Le déversoir se situe à la jonction du réseau d'eaux usées pour la Mèbre et pour la Sorge. Pour définir le taux d'eau claire parasite, au vu de la qualité des données, il a été décidé de comparer les données à partir du 4 mars 2014. Le débit d'eau claire parasite est de 330 litre/s. Le taux de séparation des eaux de ruissellement a également été ajusté.

DO 330		DO 11-12	
Débit moyen [l/s]	86	Débit [l/s]	556
Moyenne des différences [l/s]	41	Moyenne des différences [l/s]	331
Pourcentage ECP	32.5 %	Pourcentage ECP	37 %

Table 11: Débit moyen et ECP aux déversoirs DO330 et DO11-12 pour la période de janvier à mars 2014

Le calage n'est pas optimum, spécialement pour le déversoir DO11-12 dû à la mauvaise qualité des données. La campagne de mesure est courte pour effectuer un bon calage. Il serait judicieux de mesurer les données pour une année entière et à plusieurs emplacements du réseau.

C. Crue du 26.07.2008 calage des bassins de rétention

Afin de simuler le fonctionnement des bassins de rétention correctement, il a été décidé de reproduire l'événement du 26 juillet 2008.

Des précipitations allant jusqu'à 100 mm/h ont été mesurées sur le bassin versant de la Mèbre, ce qui a provoqué une crue de type extrême. La rivière a débordé à de nombreux endroits provoquant d'importants dégâts. A la station de Mèbre aval, le pic du débit a été mesuré à 44 m³/s. D'après une étude réalisée par Hydran-EPFL sur la Chamberonne (Jarrar I., Consuegra D., 1996), la Sorge et la Mèbre, il a été estimé que le temps retour de la crue était largement supérieur à 200 ans pour la Mèbre amont (voir figure 30).

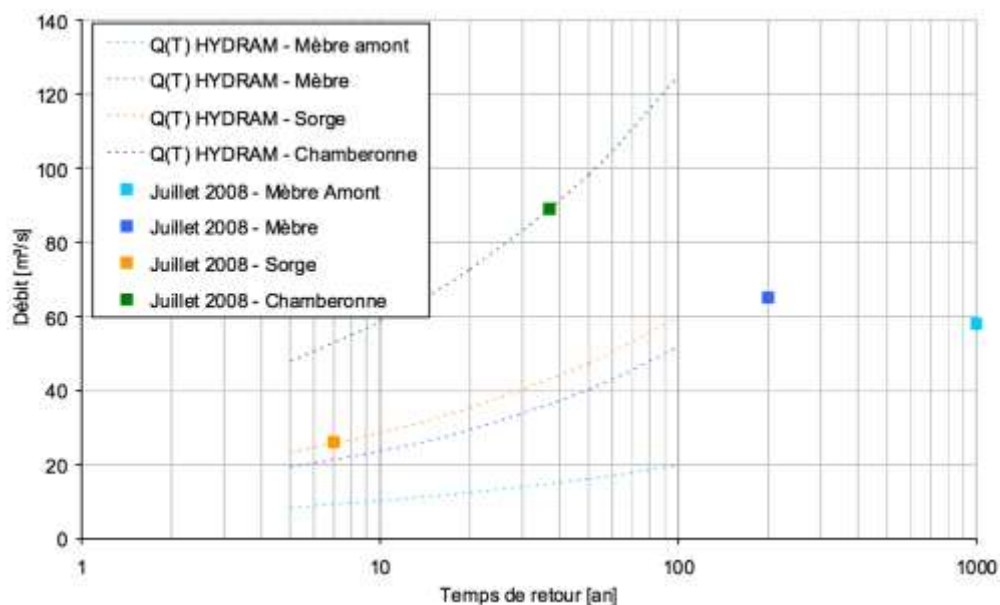


Figure 30: Temps retour des débits à la station de Mèbre amont , Sorge et Chamberonne avec le débit mesuré lors de la crue de juillet 2008 (source: AquaVision, 2009)

Les quatre bassins de rétention ont bien joué leur rôle. Ces ouvrages ont été conçus pour retenir une crue centennale. De plus, les orifices de contrôle ont été obstrués par des branches provoquant la montée du niveau d'eau dans les bassins. Ainsi, l'ouvrage R8 se situant à Crissier en aval de la route cantonale Crissier-Prilly, qui est censé réguler le débit de la rivière avant de rentrer dans le voûtage

qui passe sous la ville de Renens, à déverser au-dessus de la crête. Ce déversement a provoqué des inondations à l'entrée du voûtage.

Le bureau Aquavision a été mandaté pour analyser cette crue. L'analyse a permis de déterminer la chronologie des événements principaux.

Étapes principales de l'événement	Heure
Début de la pluie	18:40
Déversement R8	19:56
1er pic de pluie	20:00
Mise en charge de l'aval du voûtage de Renens	20:14
Mise en charge de l'amont du voûtage de Renens	20:18
Début de débordement de l'immeuble en amont du voûtage de Renens	20:20
Déversement R9	20:30
Fin de mise en charge de l'amont du voûtage de Renens	21:05
2ème pic de pluie	21:10
Fin de débordement de l'immeuble en amont du voûtage de Renens	21:30
Fin de mise en charge de l'aval du voûtage de Renens	21:39
Fin du déversement R9	22:35
Fin de la pluie	23:00
Fin du déversement R8	23:30
Fin de l'événement	05:00

Table 12: reconstitution de la crue de juillet 2008 (source: AquaVision, 2009)

1. Pluviométrie

Toujours dans la même étude, plusieurs hyétogrammes ont pu être définis à différents points du bassin versant à l'aide de données radars réalisé par météo suisse toutes les 10 min (voir figure 31). Les données ont été relevées manuellement sur les graphiques pour quelques points (voir annexe E). La précision n'est ainsi pas optimale.

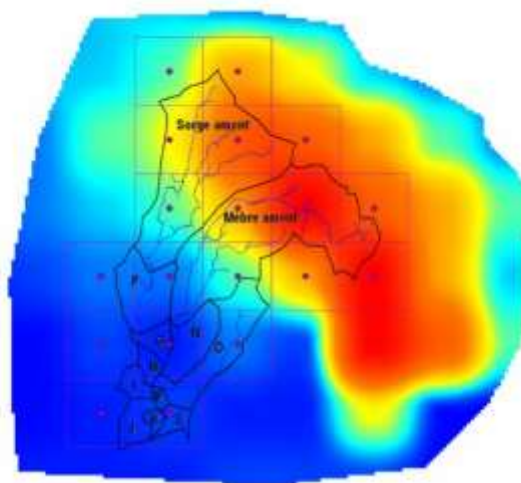


Figure 31: Grille de valeurs fournies par le radar de météoSuisse à 18h50 le 26 juillet 2008 (source: AquaVision, 2009)

2. Résultat de la simulation aux stations limnimétriques

Les mesures de débit faites lors de la crue ne sont pas complètes (voir figure 32). Les stations limnimétriques ont cessé de fonctionner lors d'un débit supérieur à $20 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la station à Mèbre aval et lors d'un débit supérieur à $42 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la station de la Chamberonne. Ainsi, les pics de débit ont dû être reconstitué manuellement.



Figure 32: Estimation des débits à la station de Chamberonne et de Mèbre aval lors du 26.07.2008 mesurés par la DGE

A partir de la reconstitution des débits de la crue et l'historique réalisé par AquaVision, le dimensionnement des orifices a été ajusté en faisant plusieurs essais. En effet, il a été observé que les orifices ont été obstrués par des branches ce qui a accéléré la montée du niveau d'eau dans les réservoirs. Afin de simuler correctement cet évènement, la hauteur de l'orifice R8 a été diminuée de 1 [m] à 0.8 [m], et les zones à risque pour les inondations ont été simulées à l'aide d'un objet de diversion.

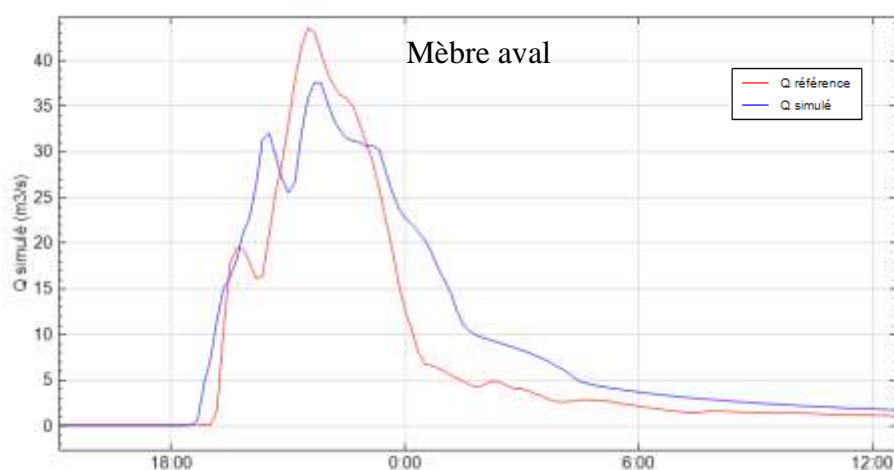


Figure 33: Résultat du calage pour la crue du 26.07.2008 à la station de Mèbre aval

La station de Mèbre aval obtient un Nash 0.87 avec un bilan de volume de 1.38 (voir figure 33). Pour estimer au mieux les débits, il a fallu augmenter les précipitations sur la partie de Mèbre aval par un coefficient de 1.6. En augmentant les précipitations le premier pic de crue est surestimé. En ce qui concerne la décrue, la simulation est plus lente que les mesures. Cependant, elle correspond à la vitesse à laquelle se vide le bassin de rétention R9. On peut poser l'hypothèse que les mesures estimées sont fausses ou que le volume retenu est trop élevé pour la simulation.

A la station de mesure de la Chamberonne, la simulation obtient un Nash de 0.77 et un bilan de volume de 1.37 (voir figure 34). On observe le même problème avec la surestimation du premier pic de crue et la simulation de la décrue qui s'effectue plus lentement que mesurée. De plus, le début de la crue simulée commence environ 30 min plus tôt. Le problème peut venir d'un problème de routage, en effet, le temps d'écoulement dans la rivière étant très court pour un bassin versant de cette taille, il a donc été décidé de ne pas faire de routage. L'autre hypothèse est que la répartition des précipitations ne soit pas reproduite correctement.

3. Simulation des débordements

Une simulation des débordements a été faite afin de reproduire un volume proche de la crue. Cependant, la reproduction du comportement d'une inondation est complexe, car une partie de l'eau qui est sorti de son lit va ruisseler à nouveau vers le cours d'eau.

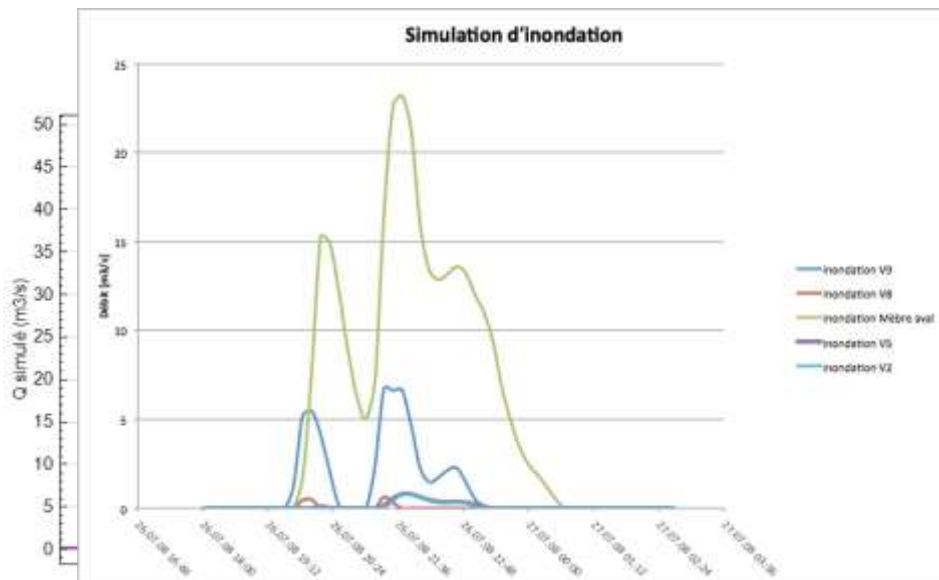


Figure 35: Simulation des inondations lors de la crue du 26.07.2008 aux zones à risques d'inondations

Avec la relation de débordement déterminé à partir des capacités des tronçons définis par le LCH (LCH, 1999) le volume des inondations est considérable (plus de $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3$, spécialement pour la zone de Mèbre aval. Par exemple le débordement survenu en amont du voûtage V8 à l'entrée de Renens a provoqué l'inondation de la cave d'un immeuble.

4. Fonctionnement des déversoirs de sécurité des bassins de rétention

Il apparaît clairement que le déversoir R8 a trop déversé (voir figure 36). Comme il a été dit, l'orifice a été obstrué par des branches ce qui a provoqué une montée plus rapide du niveau d'eau. Il est important de souligner l'aspect extrême de la crue qui a frappé la Mèbre (temps retour $\gg 200$ ans). Quant aux déversoirs R2 et R5 (R5a) ils n'ont pas déversé car ils ont moins été touchés par les précipitations. Le déversoir R5b correspond au déversoir latéral qui remplit le bassin de rétention.

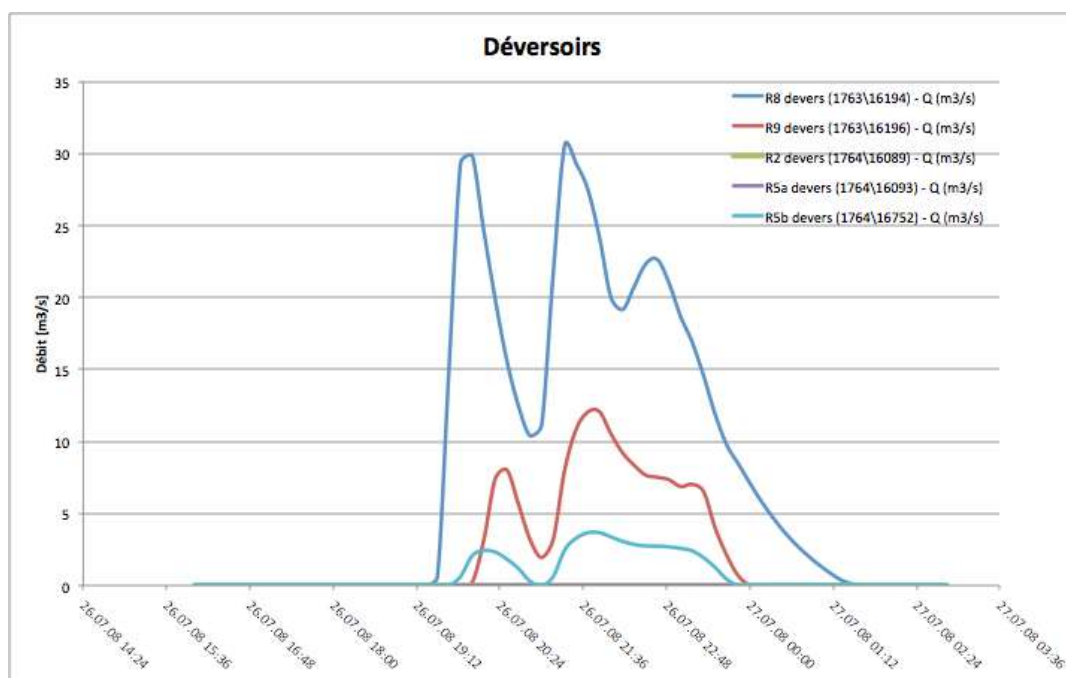


Figure 36: Simulation des déversements des bassins de rétention lors de la crue du 26.07.2008

5. Efficacité des bassins de rétention

Le cas extrême de cet évènement permet d'étudier le fonctionnement des différents ouvrages. Ainsi, il est possible d'analyser le rôle des bassins de rétention. Pour la simulation il a été décidé de ne pas simuler les inondations, de cette façon il est plus facile de se rendre compte de l'effet provoqué.

L'étude réalisée par le LCH (LCH, 1999) a encouragé la construction de quatre bassins supplémentaires de rétention dans le bassin versant. Il serait intéressant d'étudier l'effet de ces infrastructures sur la crue survenue en 2008.

Sur la Mèbre, l'effet de laminage du premier pic de crue est bien marqué. Le débit passe de 45 m³/s à 36.2 m³/s (voir figure 37). Cependant, l'effet est mineur sur le deuxième pic de crue car le bassin de rétention est déjà saturé.

L'effet est similaire sur la Chamberonne. L'effet du laminage est plus important car la crue est laminée par les quatre bassins versants. Ainsi, le premier pic passe de 72 m³/s à 62 m³/s et pour le deuxième pic, le pic du débit passe de 78 m³/s à 72 m³/s (voir figure 37).

On peut conclure que les ouvrages de sécurités ont bien joué leur rôle. Toutefois, si l'on pouvait prévoir à l'avance le débit dans la rivière, on pourrait imaginer une gestion en temps réel des bassins de rétention. Il serait possible ainsi, d'optimiser le laminage de la crue en décidant de remplir un des bassins au début de la crue pour réduire le débit dans la rivière, ainsi, les autres bassins pourraient retenir plus efficacement le deuxième pic de crue.

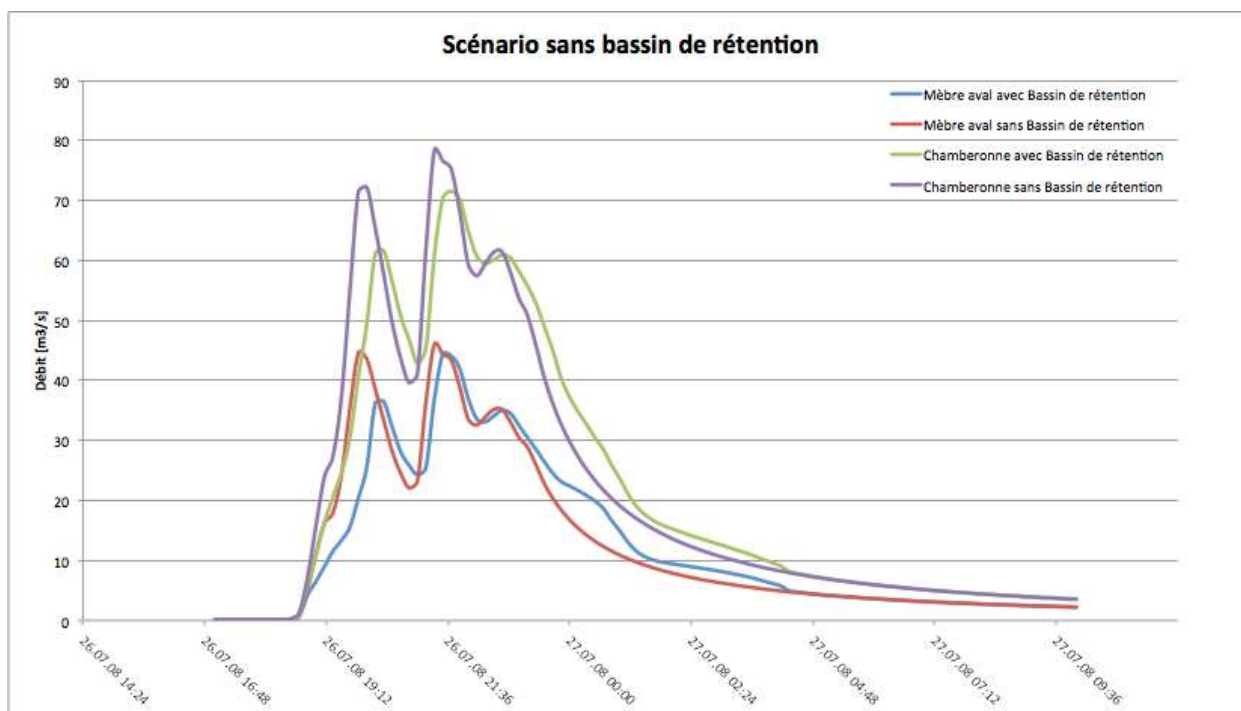


Figure 37: Résultats de la simulation du scénario sans les bassins de rétention lors de la crue du 26.07.2008 aux stations de Mèbre aval et Chamberonne

D. Analyse de la pollution par les eaux usées et les eaux de ruissellement

L'un des problèmes identifiés pour la zone est la pollution par des bactéries fécales de la baie de Vidy (voir partie II.B.). D'après le PGGEi pour la région aval du bassin (DCPE 250, 1999), le mauvais état du récepteur d'eau usée à plusieurs endroits pourrait en être la cause. Les autres causes sont la pollution agricole (Stadler, 2013), les eaux de ruissellement (Schneider, 2009) et les déversoirs d'orage (Martinerie R., 2010). Avec le modèle du bassin versant il est possible de connaître la part d'eaux usées et de ruissellement qui finit dans les cours d'eau.

1. Déversoir d'orage

Un bilan du fonctionnement des déversoirs a été fait pour l'année 2013, ainsi qu'une estimation de la charge polluante que cela représente dans la rivière.

Une première analyse (voir table 13) a été faite pour savoir si les déversoirs d'orages répondent aux exigences minimales définies par la directive VSA (Association Suisse des Professionnels de la Protection des Eaux, 2007). Pour un gros ruisseau du plateau il faut que la durée de rejet soit inférieure à 5 h par année, le volume spécifique inférieur à 700 m³/ha liée à l'ouvrage et que le nombre de rejet soit inférieur à 20 par année.

Paramètre	DO1009	DO1053	DO11-12	DO138	DO1398	DO1400	DO141	DO210	DO330
Nombre [n/année]	30	0	0	0	5	4	9	1	27
Vol (m3)	3898.70	0.00	0.00	0.00	273.93	110.57	3041.60	7.34	6314.80
hectar réduit	530.47	144.53	1435.55	64.81	57.59	14.43	69.97	42.84	394.13
Volume spécifique [m3/ha _{red}]	7.35	0.00	0.00	0.00	4.76	7.66	43.47	0.17	16.02
Temps (h)	77.1667	0	0	0	6.333	3.333	11.1667	0.833	83

Table 13: Bilan des déversoirs d'orage du bassin versant pour l'année 2013

Les déversoirs DO 1009 et DO 330 déversent plus que les 20 fois par année exigée et leurs temps de fonctionnement sont trop élevés. Malgré cela le volume spécifique rejeté est acceptable.

Afin de quantifier l'impact des déversoirs, le volume total déversé a été calculé pour chaque déversement (voir table 14). Une partie de ce volume correspond aux rejets d'eaux usées et aux eaux de ruissellement sur les zones imperméables. Dans le tableau ci-dessous 30 événements sont récapitulés :

No Déversement	Début	Fin	Durée	Volume [m³]	EU [m³]	Eaux de ruissellement [m³]
1	11.avr.13 22:30	12.avr.13 02:10	03:40:00	813.7	24.0	568.0
2	03.mai.13 09:10	03.mai.13 10:10	01:00:00	63.1	9.3	42.5
3	08.juin.13 19:20	08.juin.13 20:00	00:40:00	4.4	1.1	3.3
4	09.juin.13 17:00	09.juin.13 17:50	00:50:00	33.2	4.1	23.6
5	20.juin.13 07:00	20.juin.13 08:10	01:10:00	109.3	15.9	86.9
6	20.juin.13 20:10	20.juin.13 20:50	00:40:00	17.8	3.2	12.5
7	28.juil.13 23:20	29.juil.13 05:20	06:00:00	513.8	16.6	442.1
8	29.juil.13 05:50	29.juil.13 14:10	08:20:00	1'104.4	137.9	695.8
9	07.août.13 18:20	07.août.13 19:00	00:40:00	4.8	1.2	3.5
10	24.août.13 11:00	24.août.13 13:10	02:10:00	452.6	39.3	326.4
11	24.août.13 15:10	24.août.13 15:20	00:10:00	0.2	0.0	0.2
12	07.sept.13 21:10	07.sept.13 23:00	01:50:00	589.7	27.7	460.4
13	08.sept.13 17:50	08.sept.13 20:40	02:50:00	1'896.1	107.4	1'363.5
14	29.sept.13 17:10	29.sept.13 17:30	00:20:00	11.1	0.9	8.7
15	04.oct.13 21:10	04.oct.13 22:10	01:00:00	68.6	6.1	56.5
16	10.oct.13 10:20	10.oct.13 12:20	02:00:00	351.3	29.2	284.6
17	12.oct.13 07:40	12.oct.13 08:40	01:00:00	6.3	1.3	3.8
18	14.oct.13 18:00	14.oct.13 19:00	01:00:00	12.8	2.5	7.6
19	20.oct.13 14:20	20.oct.13 14:30	00:10:00	0.2	0.0	0.1
20	23.oct.13 11:30	23.oct.13 17:30	06:00:00	2'557.2	145.7	1'604.6
21	27.oct.13 07:00	27.oct.13 11:20	04:20:00	1'136.9	86.5	739.6
22	29.oct.13 02:10	29.oct.13 05:00	02:50:00	170.9	3.7	116.9
23	03.nov.13 00:00	03.nov.13 02:10	02:10:00	477.6	11.3	336.9
24	03.nov.13 06:50	03.nov.13 08:40	01:50:00	158.2	14.7	94.2
25	08.nov.13 20:30	08.nov.13 23:10	02:40:00	1'337.0	59.8	825.8
26	08.nov.13 23:40	09.nov.13 01:40	02:00:00	226.3	7.5	135.5
27	10.nov.13 06:40	10.nov.13 10:00	03:20:00	347.3	31.1	198.1
28	25.déc.13 12:00	25.déc.13 19:00	07:00:00	569.5	56.7	329.0
29	25.déc.13 23:00	26.déc.13 00:30	01:30:00	20.6	1.7	11.1
30	28.déc.13 17:30	28.déc.13 20:30	03:00:00	79.9	11.8	45.5

Table 14: Durée et volume de chaque déversement pour l'année 2013

Entre le mois de juin et début septembre, 9 rejets sont survenus dont quatre supérieurs à 500 m³ ce qui peut représenter un risque de contamination pour les plages. Sachant que la baie de Vidy est la

plus grande plage du canton de Vaud cela peut être problématique. Afin de déterminer si le risque est bien réel, une estimation du nombre de bactéries fécales finissant dans la baie a été faite.

2. Bilan pollutif à l'embouchure de la Chamberonne

Il serait intéressant de connaître la pollution que représente ces déversements et si l'ordonnance sur la protection des eaux est respectée. L'ordonnance Oeaux 824.01¹⁰ précise, quelque soit le débit, que la demande biologique en oxygène (DBO5) doit être entre 2 à 4 mgO₂/l et que la concentration en ammonium soit inférieure à 0.2 mg/l pour une température supérieure à 10 °C et de 0.4 mg/l pour une température inférieure à 10°C. Il existe plusieurs autres exigences, mais ces paramètres ne seront pas utilisés. D'autres paramètres sont estimés mais ils ne sont pas tenus par des exigences : la matière en suspension, le demande chimique en oxygène et le phosphore totale. Les estimations des concentrations standards en polluant (voir table 15) dans les eaux usées et les eaux de ruissellement sont faites d'après les données fournies par la DGE (Martinerie, 2010).

Concentration moyenne [mg/l]		
	Eaux usées	Eaux de ruissellement
DCO	480	94
DBO5	240	16
MES	240	68
Ptot	8.8	0.64
NH4+	28	0.48

Table 15: Concentration standard en polluant des eaux usées et eaux de ruissellement (source : Martinerie, 2010)

Pour estimer la pollution, il a été décidé d'étudier l'embouchure de la Chamberonne. Pour les 5 événements de déversement principaux, le volume d'eau écoulé dans la rivière a également été calculé (voir table 16). Les concentrations en polluants sont estimées d'après les données de la table 15.

No	DO [m³]	EU [m³]	IMP [m³]	Chamberonne [m³]	DCO [mg/l]	DBO5 [mg/l]	MES [mg/l]	Ptot [mg/l]	NH4 [mg/l]
8	1'104.4	137.8	695.8	329'885.6	0.40	0.13	0.24	0.01	0.01
13	1'896.1	107.4	1'363.5	103'346.6	1.74	0.46	1.15	0.02	0.04
20	2'557.2	145.7	1'604.6	304'158.4	0.73	0.20	0.47	0.01	0.02
21	1'136.9	86.5	739.6	172'675.5	0.64	0.19	0.41	0.01	0.02
25	1'337	59.8	825.8	132'355.5	0.80	0.21	0.53	0.01	0.02

Table 16: Bilan de pollution des déversoirs pour l'année 2013

Les rejets dilués des déversoirs ne dépassent pas les exigences. Il est important de souligner qu'une partie de la pollution provient également du ruissellement de surface et de l'agriculture.

¹⁰ <http://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19983281/201401010000/814.201.pdf>

3. Estimation de concentration de E.Coli et d'Enterocoque dans la Chamberonne et la baie de Vidy

La qualité de l'eau de baignade à la baie de Vidy a été classée en zone D après un fort évènement pluvieux (Service de la consommation et des affaires vétérinaires, 2013), ce qui veut dire qu'une atteinte à la santé est possible. En se basant toujours sur les évènements de déversement, une estimation des bactéries E.Coli et Entérocoque a été faite afin de déterminer leur impact les cours d'eau et le lac.

En se basant sur les résultats de l'étude de Jérôme Plard sur les rejets d'assainissement (Plard J., 2009), il a été possible d'estimer le nombre de bactéries (voir figure 38). Une relation empirique avec la demande chimique en oxygène permet de déterminer le nombre de bactérie E.Coli, et le nombre d'Enterocoque est déterminé avec la concentration de matière en suspension.

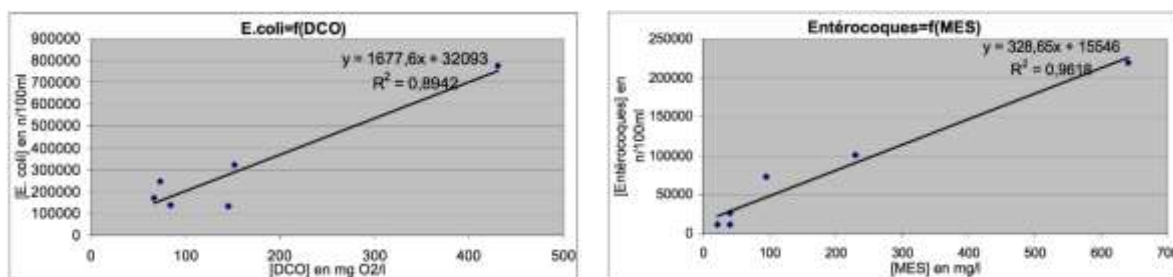


Figure 38: Relation linéaire entre la concentration en DCO et le nombre d'E.Coli et entre la MES et le nombre d'Enterocoques (source: Plard J., 2009)

Pour calculer la concentration de bactérie dans la baie, le volume a été estimé à une vingtaine d'hectares avec une profondeur moyenne de 4 m, ce qui donne un volume de 832'000 m³ (voir figure 39).



Figure 39: hypothèse de surface de dilution de la Chamberonne dans la baie de Vidy

Les exigences sur la baignade définissent un risque élevé (Classe D) de contamination pour une concentration supérieure à 1000 (n/100ml) d'E.Coli et supérieur à 300 (n/100ml) pour les Entérocoque (Schaffner, M., Studer, P. Ramseier, C., 2013). On constate que ces concentrations ont été dépassées huit fois durant l'année à l'embouchure (voir table 17), dont quatre fois durant l'été (déversements 5 à 13). Lorsque la rivière se jette dans le lac, la concentration baisse mais il est difficile d'estimer la vitesse à laquelle elle se dilue dans l'eau.

No	E-Coli chb [n/100ml]	E-choli lac [n/100ml]	Enterocoque chb [n/100ml]	Enterocoque lac [n/100ml]
5	1295	37	285	8
10	2244	122	562	31
12	2493	142	675	39
13	3506	453	947	122
16	1704	100	419	24
20	1488	566	417	159
21	1290	278	340	73
25	1672	277	489	81

Table 17: Estimation de la concentration d'Ecoli et d'Enterocoque à la Chamberonne et la baie de Vidy lors des déversements d'eaux usées en 2013

E. Scénario

Maintenant que le modèle hydrologique est correctement calé, il est possible d'étudier différents scénarios. Ainsi, les différentes solutions proposées pour résoudre les problèmes qui touchent les cours d'eau vont être évaluées. La réponse proposée par la DGE au problème de la capacité hydraulique insuffisante de la Mèbre et la Chamberonne est la dérivation du ruisseau de Broye. La charge hydraulique que représente le ruisseau est-elle suffisante pour résoudre ce problème ? Quelles sont les conséquences qu'aura un tel changement sur le reste du bassin versant ? L'un des problèmes lié à la pollution des eaux est le déversement d'eaux usées dans les rivières. Que se passerait-il si toutes les communes du bassin versant développaient leur réseau séparatif d'égouts ? Un autre problème lié à la pollution est l'incapacité des petites STEP à traiter les micropolluants. Quel serait l'impact sur le réseau d'eau usée, si l'on fermait ces STEP et raccordait les communes au récepteur d'eau usée de la STEP de Vidy ?

De plus, il est possible d'évaluer l'impact du développement de la région. En déterminant l'augmentation de la population et du taux d'imperméabilisation d'ici 2030, quels seront les impacts sur les cours d'eau et sur le réseau d'eau usée ?

1. Le ruisseau de Broye

Dans l'étude sur le réseau d'eaux usées réalisé par le bureau e-dric (Martinerie, 2010) il a été démontré qu'une grande partie du bassin versant du ruisseau (124 ha) de la Broye ne s'écoule pas dans son exutoire naturel, la Mèbre, mais se déverse dans le réseau d'eaux usées de l'Est lausannois, ce qui a comme conséquence une augmentation des déversements des déversoirs d'orage.

Pour y remédier, il est nécessaire d'augmenter le taux de séparation des eaux usées et de ruissellement. Mais en augmentant le débit du ruisseau de Broye, la capacité hydraulique de la Mèbre et de la Chamberonne n'est plus suffisante (Broadhurst, 2013). Le risque d'inondation augmente considérablement. L'une des solutions proposées est de dériver le ruisseau de Broye directement dans le lac.

a) *Scénario d'année standard*

Le débit moyen en 2013 de la Broye est de 76 [l/s]. Si l'on rajoute les 124 hectares dérivés au ruisseau avec un taux d'imperméabilité de 40% (Martinerie, 2010) on observe pour l'année 2013, un débit moyen de 120 [l/s] ce qui est quasiment le double. En regardant la simulation pour le mois de mai 2013 (voir figure 40), on remarque que la différence est plus marquée lors des pics de débit. L'impact peut être désastreux pendant une crue.

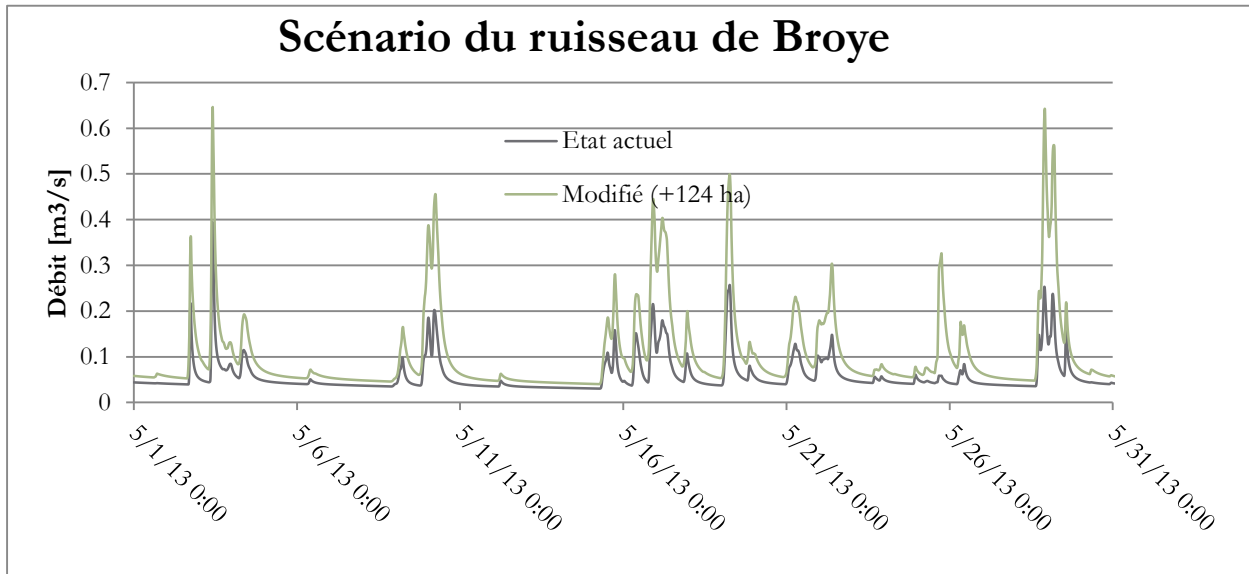


Figure 40: Débit de la Broye pour le mois de mai 2013 à l'état actuel et modifié en rajoutant les 124 hectares dérivés

Si l'on observe les débits classés (voir figure 41), on voit qu'en modifiant la Broye, les pics de débit augmentent considérablement.

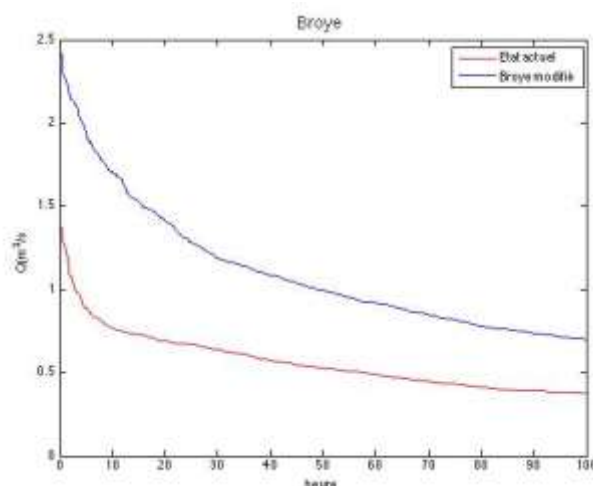


Figure 41: Calcul des débits classés pour la Broye en 2013 à l'état actuel et modifié (+124 ha)

b) Scénario de crue

Pour le scénario de crue en 2008 le débit a augmenté de 2 m³/s, soit presque le double du débit habituel (voir figure 42).

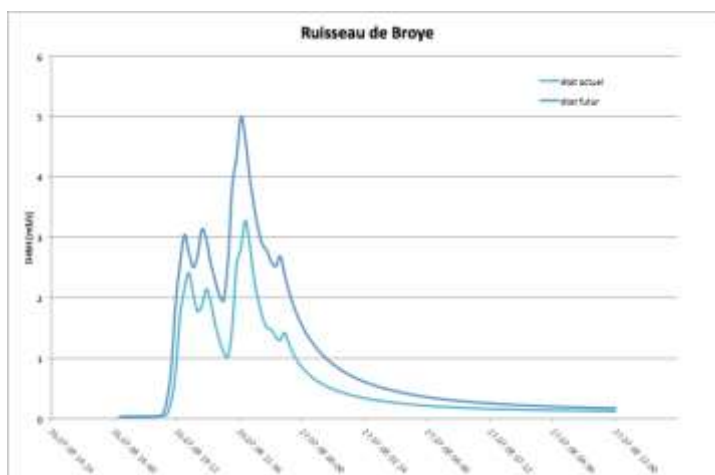


Figure 42: Résultat du débit simulation pour le scénario du ruisseau modifié lors de la crue du 26.07.2008

Si l'on simule l'impact que le ruisseau de Broye aurait eu lors de la crue de 2008, on voit que la différence n'est pas flagrante (voir figure 43). Toutefois, si l'on dérive le ruisseau de Broye cela permet de raccorder les eaux claires au ruisseau et d'augmenter le taux de séparation entre les eaux claires et les eaux usées pour la région de Renens. En développant le réseau séparatif, cela permettrait de diminuer de 70% les déversements d'eaux usées par rapport à 2013.

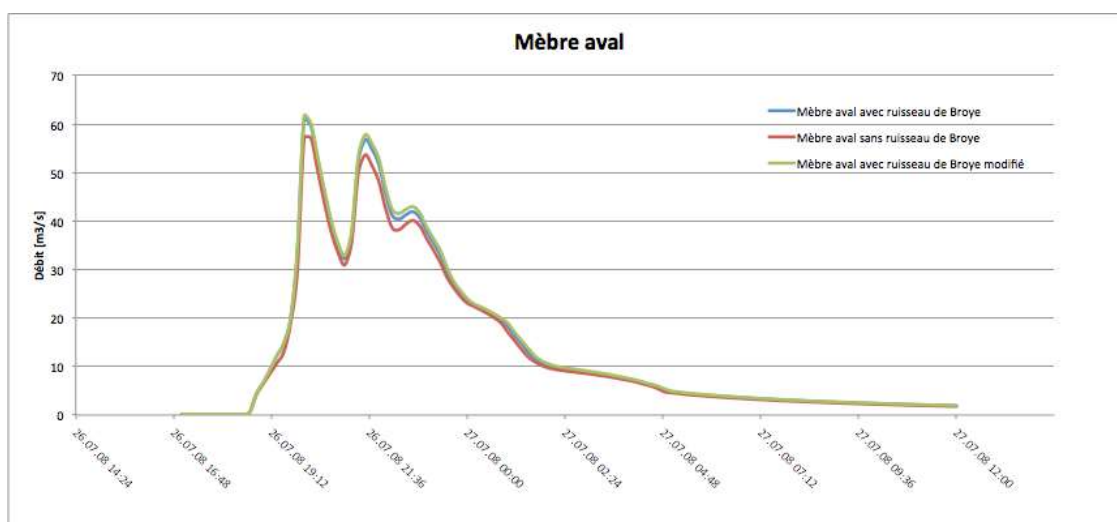


Figure 43: Résultat à la station Mèbre aval de la simulation du scénario de modification du ruisseau de Broye lors de la crue du 26.07.2008

2. Scénario extension du réseau séparatif

a) Description

Une partie du bassin versant est encore équipée d'un système d'égout combiné, ce qui a comme effet d'augmenter le nombre de déversement d'égout dans la rivière. La direction générale de l'Environnement du canton de Vaud à l'intention de transformer le réseau en système séparatif, cependant la capacité de la Chamberonne étant insuffisante, le développement du réseau d'égout est bloqué jusqu'à ce qu'une solution soit trouvée.

Une analyse a été faite, pour savoir de combien augmenterait le débit dans le cours d'eau et le nombre de déversement d'eau non traitée, si l'on augmentait le taux de séparation des eaux à 90% pour chaque sous bassin versant. L'extension du réseau séparatif a été simulée pour l'année 2013.

b) Bilan des déversoirs

En augmentant le taux de séparation des eaux, le débit d'eau usée dans le récepteur a été considérablement réduit (voir table 18). L'eau de ruissellement est directement acheminée vers le récepteur naturel (Mèbre, Sorge ou Chamberonne). De ce fait les déversements d'eau non traitée sur le réseau ou à la STEP ont été nettement réduits.

Table 18: Bilan des déversements d'eaux usées pour le scénario de l'extension du réseau séparatif pour l'année 2013

DO	Déversement		Volume total		EU		IMP	
	#	Variation	[m³/an]	Variation	[m³/an]	Variation	[m³/an]	Variation
DO1009	15	-50.0%	569.48	-85.4%	85.95	-78.8%	368.87	-85.7%
DO1053	0	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-
DO1112	0	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-
DO138	0	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-
DO1398	0	-100.0%	0.00	-100.0%	0.00	-100.0%	0.00	-100.0%
DO1400	0	-100.0%	0.00	-100.0%	0.00	-100.0%	0.00	-100.0%
DO141	0	-100.0%	0.00	-100.0%	0.00	-100.0%	0.00	-100.0%
DO210	0	-100.0%	0.00	-100.0%	0.00	-100.0%	0.00	-100.0%
DO330	8	-70.4%	418.88	-93.4%	34.11	-90.1%	277.70	-93.9%
Total	23	-69.7%	988.36	-92.8%	120.05	-86.5%	646.57	-93.0%

Il ne reste plus que les déversoirs DO 1009 et le DO 330 qui déversent. Malgré cela, le bilan pollutif n'est pas forcément meilleur, car l'eau de ruissellement s'écoule directement dans la rivière sans être traitée. En ruisselant sur les zones imperméables l'eau entraîne des matières en suspension, des hydrocarbures et d'autres polluants. L'extension du réseau d'eaux usées doit être accompagnée d'installation de traitement des eaux de ruissellement. De plus la charge supplémentaire dans la rivière peut devenir problématique. La Figure 44 présente les courbes de débits classés pour la rivière Mèbre et Chamberonne. Cela représente une charge supplémentaire pour les rivières mais pas excessive.

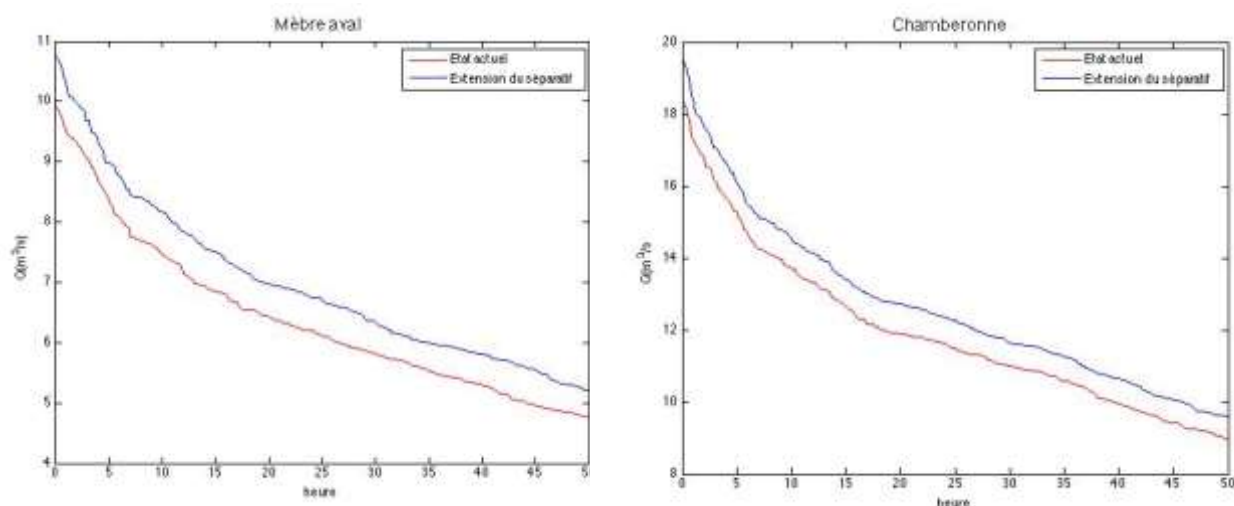


Figure 44: Débits classés calculés pour le scénario de l'extension du réseau séparatif pour l'année 2013

3. Scénario fermeture des STEP

c) Description

Trois stations d'épurations se trouvent sur la partie amont du bassin versant. Leurs capacités varient entre 500 à 1500 EH. Le canton souhaite fermer les petites STEP pour raccorder les communes au collecteur de la STEP de Vidy (Broadhurst, 2013). Les STEP ne traitent pas aussi efficacement les eaux usées et le coût des travaux de réfection serait plus élevé que de raccorder les habitants au collecteur. Une simulation a été faite en raccordant les STEP au collecteur pour l'année 2013. Par la suite une analyse sur les déversoirs et sur le volume en plus à traiter à Vidy a été faite.

d) Bilan hydraulique

Le nombre de débordement d'eaux usées augmente très peu (voir table 20). Le collecteur peut parfaitement supporter une telle charge supplémentaire. Cependant, si la zone est censée se densifier d'ici quelques dizaines d'années, il est important de prévoir si la capacité du collecteur et de la STEP de Vidy sera encore suffisante.

Le volume en plus à traiter à la STEP est de 86 l/s, ce qui est envisageable. Toutefois, le dimensionnement de la STEP de Vidy atteint son seuil de saturation. Il a été constaté que les déversoirs de la STEP débordent régulièrement (Martinerie, 2010)

	Déversement		Volume total		EU		IMP	
	#	Variation	[m³/an]	Variation	[m³/an]	Variation	[m³/an]	Variation
DO1009	30	0.0%	4138.4	6.1%	484.8	19.3%	2705.0	4.8%
DO1053	0	-	0.0	-	0.0	-	0.0	-
DO1112	0	-	0.0	-	0.0	-	0.0	-
DO138	0	-	0.0	-	0.0	-	0.0	-
DO1398	5	0.0%	273.9	0.0%	14.5	0.0%	246.2	0.0%
DO1400	4	0.0%	110.6	0.0%	3.2	0.0%	99.8	0.0%
DO141	9	0.0%	3041.6	0.0%	163.4	32.7%	2645.1	53.2%
DO210	1	0.0%	7.3	0.0%	0.3	0.0%	6.9	0.0%
DO330	29	7.4%	6462.5	2.3%	382.0	11.0%	4612.2	1.9%
Total	78	2.6%	14034.4	2.8%	1048.3	17.6%	10315.1	12.3%

Table 19: Bilan des déversements d'eaux usées pour le scénario de fermeture des STEP pour l'année 2013

4. Simulation du bassin versant pour 2030

a) Description

Le plan d'aménagement Lausanne-Morge prévoit que la partie Ouest-lausannoise va accueillir 30'000 habitants de plus d'ici 2030 (Qunicerot, R., Emmenegger, D., 2012), soit une augmentation de 39% par rapport à la situation actuelle. La Figure 42 indique la répartition de cette augmentation.

Avec les données de 2013 une simulation de l'augmentation de la population a été faite et le pourcentage de surfaces imperméables a été ajusté en ajoutant 10% de l'augmentation de la population en pourcent par sous bassin versant.

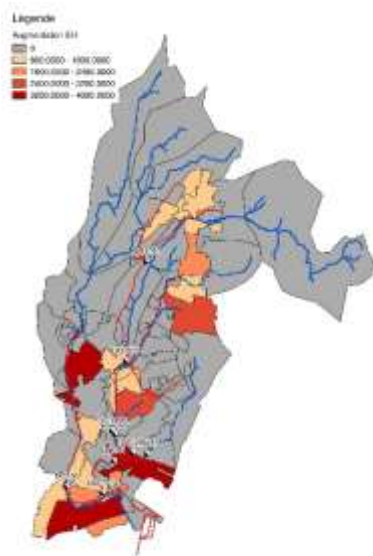


Figure 45: Augmentation du nombre d'habitant par sous bassin versant d'ici 2030

	Etat actuel	Scénario PALM		Augmentation EH	
	EH	Augmentation EH	Total	%	
Bussigny	8122	0	8122	0%	
Chavannes	7058	5600	12658	79%	
Cheseaux	3955	1080	5035	27%	
Crissier	7402	5427	12829	73%	
Ecublens	3542	3820	7362	108%	
Jouxens	1353	0	1353	0%	
Renens	20232	6413	26645	32%	
Romanel	2432	3320	5752	137%	
Saint Sulpice	3305	1780	5085	54%	
Vernand (Lausanne)	14346	2690	17036	19%	
Villars Ste Croix	421	0	421	0%	
Total	72168	30130	102298	42%	

Table 20: Augmentation du nombre d'habitant par commune d'ici 2030 (source : Martinerie, 2010)

b) Bilan des déversoirs

Le nombre de déversement augmente considérablement (voir table 22). Le volume d'eaux usées qui se retrouvera dans les cours d'eau est de 87.1% plus élevé que la situation actuelle. Il est important d'étendre le réseau séparatif pour éviter une augmentation de la pollution des rivières.

Le nombre de déversement pour le DO 1398 et le DO 141 augmente autant, car la région de Renens se développe considérablement avec plus de 6000 nouveaux habitants. Le DO 1009 est relié au collecteur venant de Vernand (Lausanne), Cheseaux-sur-Lausanne et Romanel dont la population a augmenté de plus de 137%.

Déversoir	Déversement		Volume total		EU		IMP	
	#	Variation	[m³/an]	Variation	[m³/an]	Variation	[m³/an]	Variation
DO1009	37	23.3%	5581.98	43.2%	747.71	84.1%	3759.52	45.6%
DO1053	0	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-
DO1112	0	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-
DO138	0	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-
DO1398	10	100.0%	601.42	119.6%	56.89	293.6%	521.37	111.8%
DO1400	4	0.0%	110.57	0.0%	3.22	0.0%	99.75	0.0%
DO141	11	22.2%	5431.73	78.6%	364.11	195.5%	4723.25	173.6%
DO210	1	0.0%	7.34	0.0%	0.27	0.0%	6.92	0.0%
DO330	31	14.8%	7017.44	11.1%	495.60	44.1%	4985.39	10.1%
Total	94	23.7%	18750.48	37.4%	1667.81	87.1%	14096.20	53.4%

Table 21: Bilan des déversoirs d'orage pour le scénario de densification de la zone pour l'année 2013

L'étude de ces différents scénarios a démontré qu'il est possible et nécessaire d'analyser l'aspect capacité hydraulique et l'aspect pollution conjointement. En ce qui concerne la capacité hydraulique, le scénario de dérivation du ruisseau de la Broye permettrait de résoudre un bon nombre de problèmes, tel que la capacité hydraulique insuffisante de la Chamberonne et/ou la possibilité d'étendre le réseau séparatif. L'extension du réseau séparatif aurait un impact considérable sur le cours d'eau, mais permettrait d'améliorer le rendement de la STEP de Vidy, si toutefois les eaux de ruissèlement subissaient un traitement avant de s'écouler dans la rivière. Quant à la fermeture des STEP cela n'engendrerait qu'une différence infime pour la STEP de Vidy, mais augmenterait le risque de pollution dans la rivière. Le scénario de la densification des habitants dans ces zones montre clairement la nécessité d'une coordination intercommunal et entre les communes et le canton.

F. Prédiction de débit

Le modèle hydrologique a été mis en mode prévisionnel sur le site « chamberonne.swissrivers.ch » (voir figure 46). En sélectionnant un des objets (tronçon de rivière, station de mesure ou déversoirs d'orage) une série d'information apparaît tels que le débit simulé et prédit pour les prochaines 72 heures (voir figure 47), la part d'eaux usées et de ruissèlement dans la rivière ou encore le rejet des STEP.

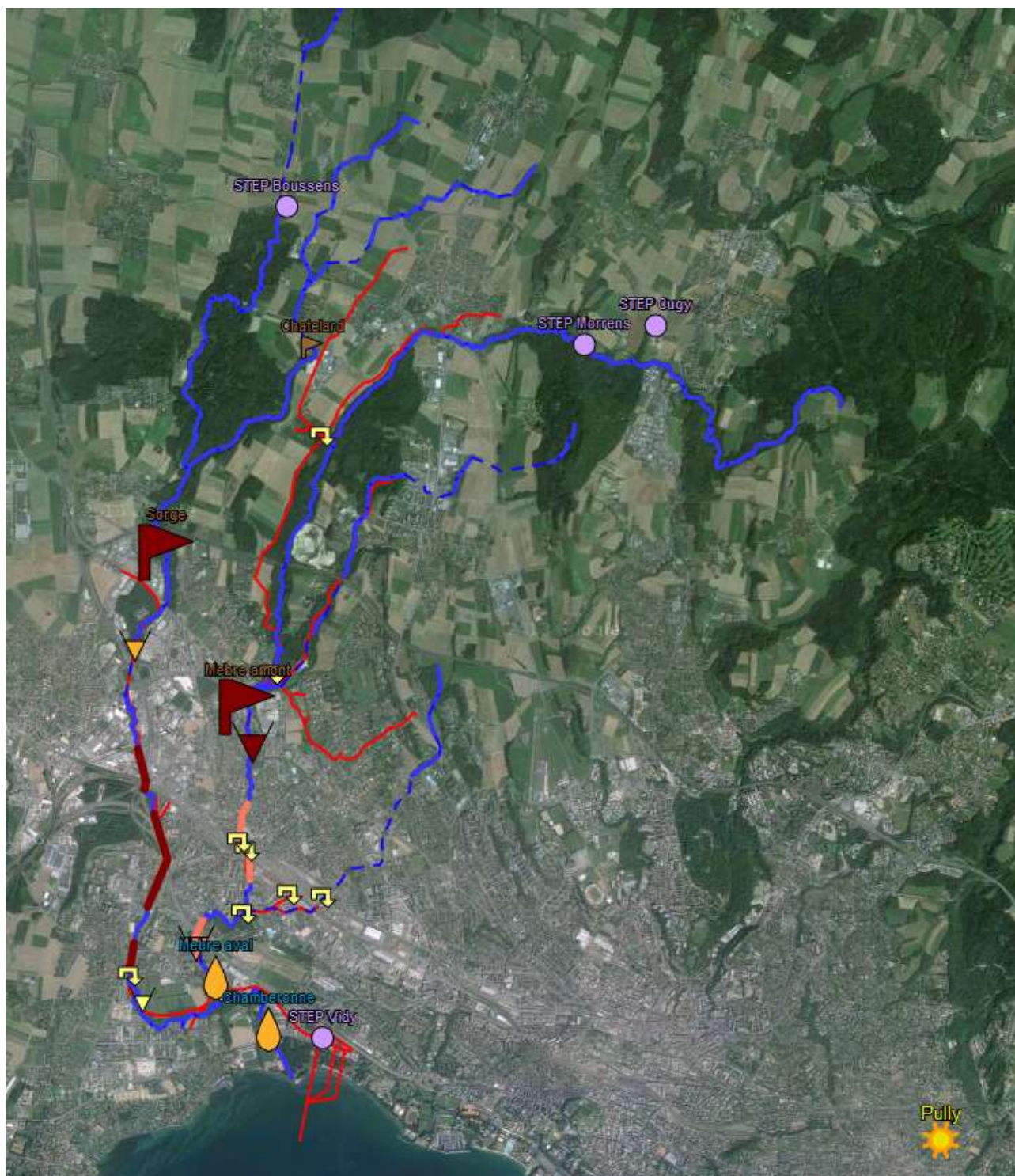


Figure 46: Interface internet du site chamberonne.swissrivers.ch. Affichage de la situation lors de la crue du 26.07.2008. En bardeau, système d'alarme de niveau 4, en jaune, déversoirs d'orage en marche et en orange, système d'alarme de niveau 3.

Les simulations et les prévisions de débits sont faites à partir des mesures et des prévisions météorologiques de Pully. Ainsi le résultat des simulations est légèrement différent de celui obtenu à partir des simulations faites avec les stations de Crissier et de l'EPFL. Les prévisions de précipitation et température sont actualisées deux fois par jours (à 10 heures et à 16 heures).

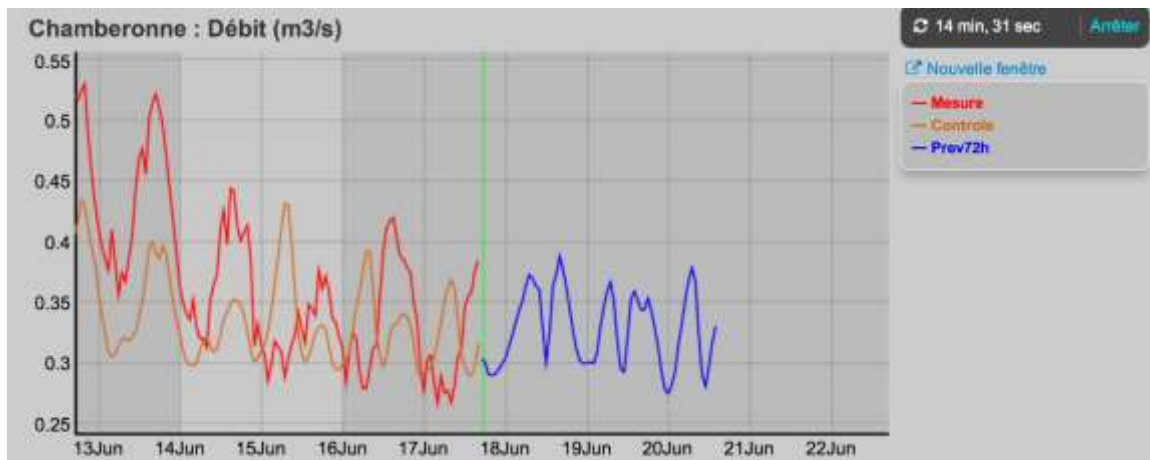


Figure 47: Simulation et prévision des débits pour la Chamberonne le 17.06.2014 sur le site chamberonne.swissrivers.ch

Les mesures et les simulations faites pour l'année 2013 ont été ajoutées (voir figure 48). Ainsi, il est possible de télécharger le résultat des simulations pour n'importe quel objet à partir du 01.01.2012 jusqu'à aujourd'hui.

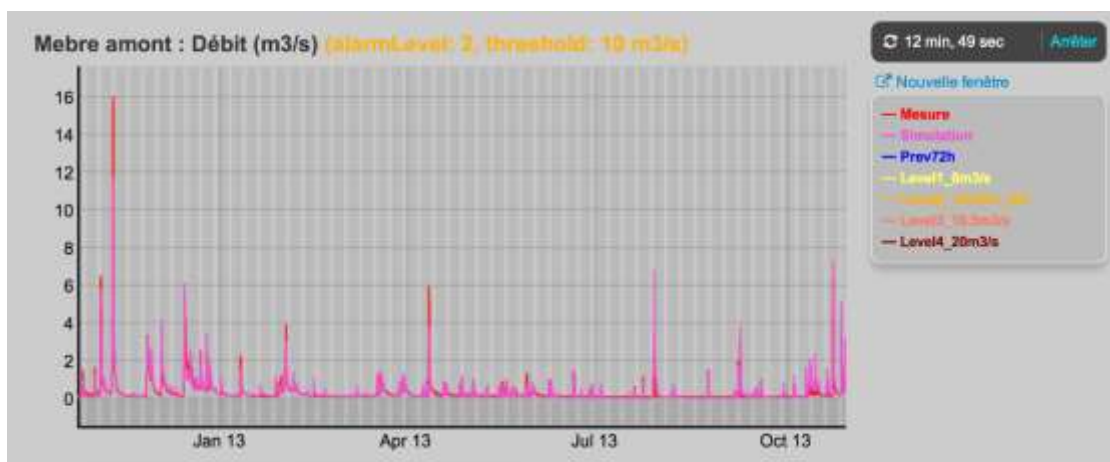


Figure 48: Historique des mesures et simulation pour Mèbre amont sur le site chamberonne.swissrivers.ch

Pour plusieurs objets un système d'alarme à quatre niveaux d'alerte a été mis en place :

- Les temps-retours de débit pour la station Mèbre aval et la station Chamberonne sur 2.33 ans, 10 ans, 50 ans et 100 ans
- Le taux de remplissage des voûtages à 50%, 80%, 100% et débordement en amont
- Les bassins de rétention remplis à 50%, 80%, 100% et volume critique de rétention (1m au-dessus de la crête de sécurité)
- Déversement des déversoirs de sécurité des bassins de rétention.
- Déversement des déversoirs d'orage.

Lors d'une alerte l'objet change de couleur en passant de jaune pour l'alerte de niveau 1 à rouge foncé pour l'alerte de niveau 4 (voir figure 46). Il est possible également possible d'envoyer un message lorsque le débit dépasse un niveau d'alarme.

VI. Discussion

A. Fiabilité du modèle hydrologique

Le modèle obtient des résultats proches des observations. Le comportement des pics de débit est bien reproduit. Il a été observé que la fonte de neige provoque des différences. Le comportement du manteau neigeux en milieu urbain mérite une analyse plus approfondie. La neige tient difficilement sur les zones imperméables (salage des routes ou des températures souvent légèrement supérieur à la norme).

Les simulations de débit sont basées sur les précipitations et les températures. Trois stations météorologiques sont utilisées : EPFL, Crissier et Pully. Cela permet d'obtenir une bonne répartition des pluies pour des situations standard mais pas pour des événements particuliers. Les orages localisés en été ne sont pas correctement reproduits dû au manque de mesures sur l'ensemble de la zone et qui a pu être observé avec la crue de 2008. La partie amont de la Mèbre a subi des précipitations allant jusqu'à 100 mm/h alors que les précipitations maximales dans la partie aval du bassin atteignaient seulement 30 mm/h. De plus, il existe une source d'erreur des mesures du cumul de pluie. En ce qui concerne les mesures de température, la mesure a été prise pour une altitude fixe - à l'EPFL à 5 cm du sol, à Crissier et à Pully à 2m. Les différences de température pour les premiers mètres au-dessus du sol peuvent avoir un effet non négligeable sur la fonte des neiges et l'estimation de l'évapotranspiration.

Le calage des paramètres se fait à partir des débits mesurés. Toutefois, pour estimer les débits, il faut définir la courbe de tarage du tronçon, puis mesurer la hauteur de l'eau. Il a été démontré que la courbe de tarage est valable pour de faibles débits, mais rarement pour des débits élevés. De ce fait, il est nécessaire d'extrapoler la courbe de tarage, ce qui induit une source d'erreur importante. Le fonctionnement des ouvrages de protection (déversoir d'orage et bassin de rétention) a été déterminé à l'aide de simulation, toutefois, il n'y a pas eu d'étude permettant de valider le paramétrage. Il est envisagé d'acquérir les données en temps réel du volume pompé par l'EPFL et par l'UNIL. Ainsi, la précision du débit simulé à la Chamberonne sera améliorée.

Il est important de garder en tête les faiblesses d'un modèle hydrologique, ainsi il devient plus aisé de l'améliorer. Toutefois, il est plus important de réduire les sources d'erreurs des mesures avant d'essayer d'améliorer le modèle hydrologique. Des bonnes données permettent d'obtenir un bon modèle hydrologique.

B. Utilité d'un modèle de prédiction

1. Système d'alarme de crue

L'un des points fort d'un modèle de prédiction est d'avoir un outil opérationnel pour la protection contre les crues. En fixant des seuils de débordement le long des cours d'eau, il est possible de prévoir les débordements et donc de renforcer les rives temporairement pour limiter des dégâts matériels. Pour éviter les pertes humaines il faut prévoir un plan d'évacuation des populations exposées au risque de débordement, car en cas de crue extrême l'évacuation de la population est indispensable. Pour décider de la mise en œuvre de mesures d'urgences, il est indispensable d'avoir des données en temps réel et également des prédictions (Jordan, 2007). Ce type de plan d'intervention nécessite plusieurs niveaux d'alarmes et de mobilisation. La région de Baden-Württemberg a mis en place ce type de plan (Jordan, 2007). Lorsque la hauteur de l'eau dépasse le premier niveau d'alarme, on

prévient les agents de sécurité civile d'un risque éventuel. Si la deuxième valeur est dépassée, des mesures de protection doivent être prises telles que le rehaussement des berges. Et si la troisième valeur est dépassée, il faut décréter l'évacuation de la population. Grâce aux prévisions quantitatives de précipitation, il est possible de prévoir les crues et ainsi, le plan d'évacuation peut être décidé avant qu'advienne une situation de danger plus difficile à gérer.

2. Outil d'étude

Les modèles hydrologiques sont basés sur maintes hypothèses. Il est indispensable de vérifier certaines de ces hypothèses afin de les valider. Un outil de prévision de débit peut permettre de prévoir une campagne de mesures de débit pour améliorer la courbe de tarage aux stations limnimétriques. Comme il est démontré il manque des informations sur les gros débits. Par exemple, pour la station de Sorge, les débits supérieurs à 0.9 [m³/s] sont extrapolés. Ainsi, en prévoyant un débit supérieur un jour à l'avance, il serait possible de vérifier si l'extrapolation est correcte. Il serait également possible de vérifier si la prévision du fonctionnement d'un des ouvrages est correcte. Ainsi, il serait possible d'ajuster les paramètres des déversoirs d'orages ou des bassins de rétention.

C. Evolution du bassin versant de la Chamberonne

La région Ouest-Lausannoise est en pleine expansion. Le plan d'agglomération Lausanne-Morge prévoit que la zone va accueillir plus de 30'000 EH en plus. Ce développement va augmenter le taux d'imperméabilisation, ce qui va diminuer le temps de concentration et augmenter le volume d'eau dans la rivière augmentant le risque de crue. La pollution par les eaux de ruissèlement et les déversoirs d'orage risque de devenir catastrophique.

La volonté de fermer les STEP en amont et de raccorder les communes au collecteur de la STEP de Vidy aura un impact sur les déversoirs d'orage et sur le volume d'eau à traiter, mais cela est envisageable si d'autres actions conjointement sont prises tels que l'extension du réseau séparatif.

L'extension du réseau séparatif permettrait de réduire fortement les débordements des eaux usées, cependant le volume d'eau dans les cours d'eau augmenterait de façon significative.

Pour remédier au problème de capacité hydraulique de la rivière et du collecteur d'eaux usées, la DGE étudie la possibilité de dériver le ruisseau de Broye. En allégeant la Mèbre et la Chamberonne de ce ruisseau, cela permettrait de développer le réseau séparatif, de raccorder les communes de Boussens, Cugy et Morrens au réseau d'eaux usées et de ce fait d'accueillir plus d'habitant dans la région.

Néanmoins, cette solution est très onéreuse et ne résout qu'une partie du problème. Une autre solution serait de faire une étude détaillée sur les tronçons de rivière présentant une capacité hydraulique insuffisante et de chercher une solution pour augmenter leurs capacités. La solution la plus efficace est la revitalisation des cours d'eau. Il a été observé que les cours d'eau sont fortement endigués et que la qualité de la biocénose est médiocre (Schneider, 2009). En augmentant l'espace du cours d'eau, l'objectif est de lui redonner son état dynamique propre (régime de charriage, morphologie et régime des débits), qu'il retrouve une biodiversité propre à la région et qu'il s'intègre dans le paysage.

Les communes en aval du bassin versant se sont réunies pour créer le PGEEi afin d'améliorer la gestion du récepteur d'eau usée. La DGE s'occupe des aspects qui touchent la rivière. Et finalement le Schéma Directeur de l'Ouest-Lausannois est chargé d'améliorer le cadre de vie et de mettre en valeur le paysage. Une organisation permettant de réunir les trois acteurs (le Canton, les communes et les hautes écoles) permettrait une gestion bien plus efficace. On peut imaginer un plan régional d'évacuation des eaux tel que celui adopté par le canton de Berne et de Soleure (Conseil-exécutif de canton de Berne et Soleure, 2010). Le plan contiendrait 5 modules : la qualité des eaux, l'évacuation

des eaux, l'agriculture, la capacité hydraulique et la renaturation des cours d'eaux. Il permettrait de déterminer le financement, les mesures à prendre et l'organisation d'un tel système. Pour terminer, cet outil peut servir autant dans la planification que comme outil opérationnel pour la prédiction des crues.

D. Laboratoire taille réel pour les hautes écoles

L'intérêt d'étudier ce bassin versant vient du fait que les deux hautes écoles du canton de Vaud s'y retrouvent, l'EPFL et l'Unil. De ce fait, déjà des projets ont été réalisés sur les différents aspects de la Chamberonne. Suit une liste non exhaustive sur les différents projets réalisés :

- Katherin Schneider a effectué en 2009 une analyse sur l'utilité du système modulaire gradué proposé par la directive STORM pour les rejets pluvieux.
- Jonathan Sidler a effectué un travail en 2012 sur l'impact du pompage de l'EPFL et l'Unil sur la Chamberonne.
- Cédric Imfeld a proposé une méthode de calibration d'un modèle pluie-débit pour le bassin versant de la Chamberonne.
- Lydie Chessaux et Luca Rossi ont effectué une série d'analyse en 2013 sur les sources diffuse de micropolluants dans le Léman et sur plusieurs bassins versants, dont la Chamberonne.
- Pascal Stadler a développé un modèle de transport de pesticide dans la Petite Chamberonne.
- Une étude réalisée par Marc Broadhurst a été faite sur une approche régionale de la gestion de la Chamberonne.

Du fait de la proximité, le bassin versant est un laboratoire idéal pour les différents travaux de recherche sur l'hydrologie et sur le comportement des polluants.

Ainsi, le modèle hydrologique sera un outil de référence pour les diverses études. Il pourra permettre d'effectuer l'analyse de divers scénarios. La prévision de débit permet également de planifier des campagnes de mesure, par exemple pour améliorer la courbe de tarage ou pour planifier une campagne de mesures de polluants des eaux de ruissellement. L'accès à un historique des débits et des précipitations peut permettre une série d'analyse sur la sédimentation, l'érosion des rives ou la dilution des polluants.

En conclusion, le modèle hydrologique peut constituer la première étape pour la mise en place d'une plateforme de partage de donnée sur la Chamberonne, évitant ainsi, une perte de temps considérable à chaque début de travail pour acquérir des données.

VII. Conclusion

Le bassin versant de la Chamberonne est un cas d'étude intéressant. On trouve des cas de pollutions agricoles et urbaines, un problème de capacité hydraulique et une gestion intercommunale des eaux usées. Le développement de la région est une question préoccupante vis-à-vis de la protection contre les eaux et de la protection des eaux. Il semble utile de développer un outil permettant de réunir un maximum d'information concernant les rivières. Il a été montré qu'avec ce modèle hydrologique il est possible de faire un bilan de l'hydrologie des écoulements, analyser différents scénarios par rapport aux aspects qualitatifs ou quantitatifs des cours d'eau. Autant pour la gestion de la rivière au niveau cantonal que pour des buts de recherche scientifique, cet outil trouve son utilité.

Au niveau de la gestion de la rivière, l'outil peut servir de système d'alarme de crue, d'analyse du fonctionnement des infrastructures sur les cours d'eau ou d'études de scénarios. A titre de recherche scientifique, l'outil sert également de base de données historique sur les écoulements, les déversements et les données météorologiques.

Le bassin possède toutes les différentes caractéristiques pour lancer un projet pilote permettant de combiner les efforts pour permettre d'améliorer les connaissances dans un domaine où les incertitudes sont encore nombreuses.


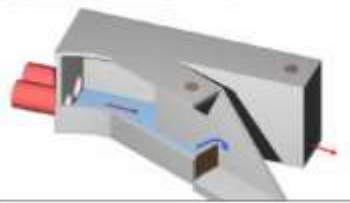
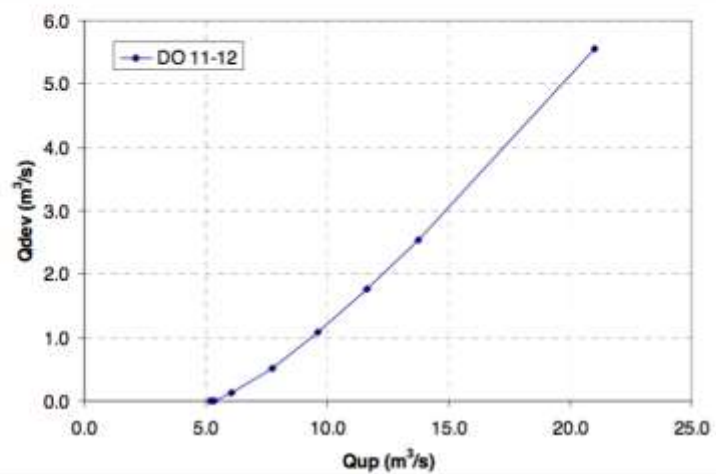
VIII. Référence


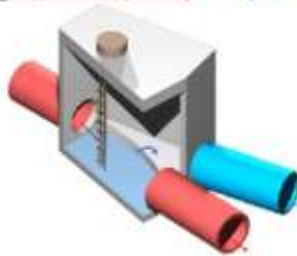
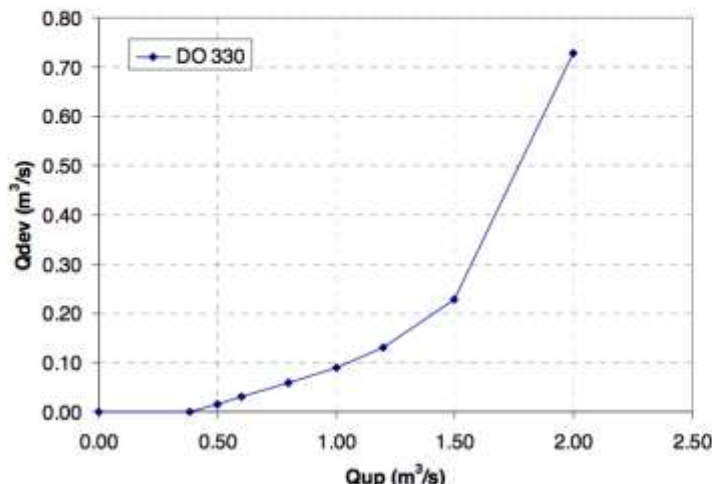
- AquaVision. (2009). Intempéries du 26 juillet 2008 sur la Mèbre – Etude hydraulique et hydrologique, AquaVision engineering, Ecublens, 61 p.
- Association Suisse des Professionnels de la Protection des Eaux. (2007). Rejets pluviaux urbains dans les eaux de surface (STORM) Directive pour la planification conceptuelle de mesures de protection, VSA Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Zurich.
- Broadhurst M. (2013). Approche régionale de la gestion de la Chamberonne, projet de semestre, Ecological Engineering Laboratory (ECOL), EPFL, 27p.
- Conseil-exécutif de canton de Berne et Soleure. (2010). VOKOS : Plan sectoriel d'assainissement 2010 des cantons de Berne et de Soleure, Berne, Soleure, 144 p
- DCPE 250. (1999) Planification de l'évacuation des eaux des agglomérations – PGEE, Service des eaux, sols et assainissement, état de Vaud
- Foehn, A., Garcin, A., Hernandez, J., Claude, A., Roquier, B., Paredes Arquiola, J. and Boillat, J.-L. (2014). RS MINERVE – User's manual v1.9. RS MINERVE Group, Switzerland.
- Imfeld C. (2011). Calibration d'un modèle pluie-débit géomorphologique pour la Chambronne, projet SIE, Laboratoire d'Ecohydrologie (ECHO), EPFL, 28 p.
- Jarra, I., Consuegra, D. (1996). Etude hydrologique des bassins versant de la Mèbre et de la Sorge, Hydram-EPFL, Lausanne
- Jordan, F. (2007). Modèle de prévision et de gestion des crues – optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue, Ph.D. Thesis N°3711, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- Jordan, F., Brauchli, T., Hernandez Garcia J., Bierle M., Boillat, J.L. (2012). RS 2012: Rainfall-runoff Modelling. E-dric, Lausanne
- LCH-EPFL (a). (1999). Etude hydrologique et hydraulique des aménagements de protection contre les crues. Calcul hydraulique de lignes d'eau et détermination des débits de débordement dans l'état actuel. LCH-EPFL, Lausanne
- LCH-EPFL (b). (1999). Etude hydrologique et hydraulique des aménagements de protection contre les crues. Optimisation numérique des seuils de fonctionnement du système complet. LCH-EPFL, Lausanne
- Plard J. (2009). Etude qualitative et modélisation de rejets d'assainissement côtier dans le cadre du projet GIRAC, rapport de stage, Veolia Eau, Nice
- Porqueddu, P., Sengül, G. (2009). Plan général d'évacuation des eaux intercommunal (Chavanne-près-Renens, Crissier, Ecublens, Renens, Saint-Sulpice) – Rapport techniques et plans (n° dossier 734), Bureau RIBI, Lausanne
- Qunicerot, R., Emmenegger, D. (2012). Projet d'Agglomération Lausanne-Morges de 2ème génération révisé, Projet d'Agglomération Lausanne-Morges, Lausanne
- Rémi Martinerie. (2010). Réseau d'assainissement de la STEP de Vidy - Collecteur Ouest - Diagnostic du réseau par modélisation hydraulique, bureau e-dric, Epalinge, 114p.
- Rietsch, J.-M., Vallier, R. (2012). 2012, Bilan 2012 de l'épuration vaudoise, Direction Général de l'Environnement, Canton de Vaud.


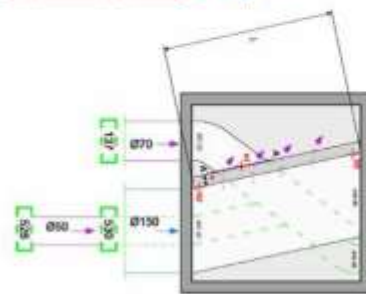
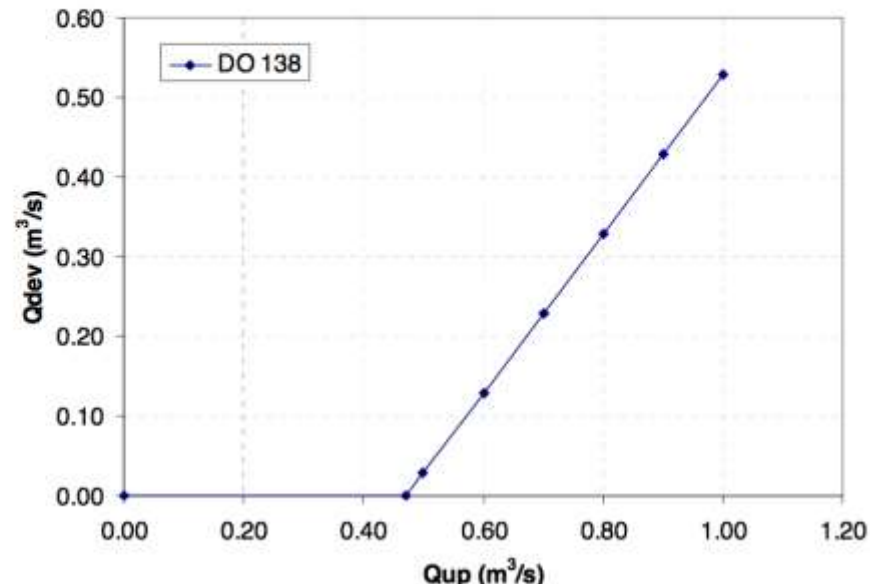
- Rossi L. Et Chesaux L. (2013). Source diffuses de micropolluants dans le Léman : étude de bassins versants spécifiques et définition d'outils d'extrapolation, Rapport d'étude de l'EPFL, laboratoire de technologie Ecologique (ECOL), sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). EPF Lausanne, 101 p + Annexes.
- Schaffner, M., Studer, P. Ramseier, C. (2013). Recommandations concernant l'analyse et l'évaluation de la qualité des eaux de baignade (lacs et rivières). Office fédéral de l'environnement, Berne, 42 p.
- Schneider K. (2009). Utilisation des outils du système modulaire gradué (SMG) pour estimer les impacts des rejets pluviaux urbains : Avantages et limitations, Travail de Master, Ecological Engineering Laboratory (ECOL), EPFL, 62 p. +annexe
- Service de la consommation et des affaires vétérinaires. (2013). Rapport d'activité - Inspection des eaux, Service de la consommation et des affaires vétérinaires Canton de Vaud, Epalinges
- Sidler J. (2012). Impacts de la station de pompage d'eau du lac de l'EPFL et de l'UNIL sur la Chambronne, Travail de Master, Ecological Engineering Laboratory (ECOL), EPFL, 97 p.
- Stalder P. (2013). Hydrology and Pesticide Transport Modelling in the Petite Chamberonne catchement, Laboratory of ecohydrology (EPFL), Lausanne

IX. Annexe


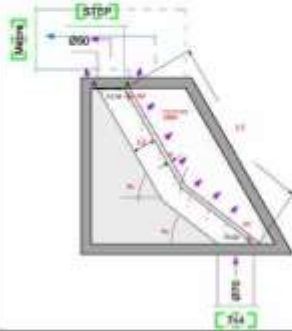
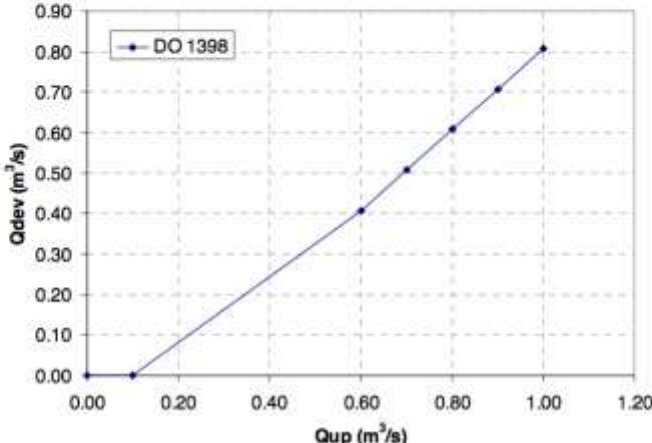
A. Déversoir d'orage

Nom	DO 11-12 (Déversoir Chamberonne)																	
Position	Mèbre aval, sur collecteur intercommunal. Point de rejet situé juste en amont de la jonction entre la Mèbre et la Sorge.																	
Géométrie	Plans issus du PGEEi Mèbre Sorge, Ribl SA. Pentes amont et aval calculées par ASST-UGR.																	
Collecteurs	Amont : 2 x diamètre 100 cm Aval (restitution STEP): Canal rectangulaire, largeur : 170 cm, hauteur : 263 cm, pente aval : 0.44 % Déversement : Canal rectangulaire, largeur 130 cm, batardeaux amovibles d'une hauteur de 108 cm																	
Hypothèses de calcul	Calcul de la relation niveau-débit dans la chambre selon la relation de Manning-Strickler ($K_s=70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) : <ul style="list-style-type: none">Début de déversement lorsque la ligne d'eau atteint la crête des batardeaux : $Q_{up,cx}=5.2 \text{ m}^3/\text{s}$.Calcul du débit déversé au dessus de la vanne Q_{dev} selon le fonctionnement d'un déversoir frontal. Hypothèse vérifiée : pas de courbe de remous depuis la STEP																	
Relation Q_{up} - Q_{dev}	 <table><caption>Data points estimated from the graph</caption><thead><tr><th>$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$</th><th>$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$</th></tr></thead><tbody><tr><td>5.2</td><td>0.0</td></tr><tr><td>6.0</td><td>0.1</td></tr><tr><td>7.5</td><td>0.5</td></tr><tr><td>10.0</td><td>1.2</td></tr><tr><td>12.5</td><td>2.0</td></tr><tr><td>14.0</td><td>2.6</td></tr><tr><td>21.5</td><td>5.5</td></tr></tbody></table>		$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$	5.2	0.0	6.0	0.1	7.5	0.5	10.0	1.2	12.5	2.0	14.0	2.6	21.5	5.5
$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$																	
5.2	0.0																	
6.0	0.1																	
7.5	0.5																	
10.0	1.2																	
12.5	2.0																	
14.0	2.6																	
21.5	5.5																	



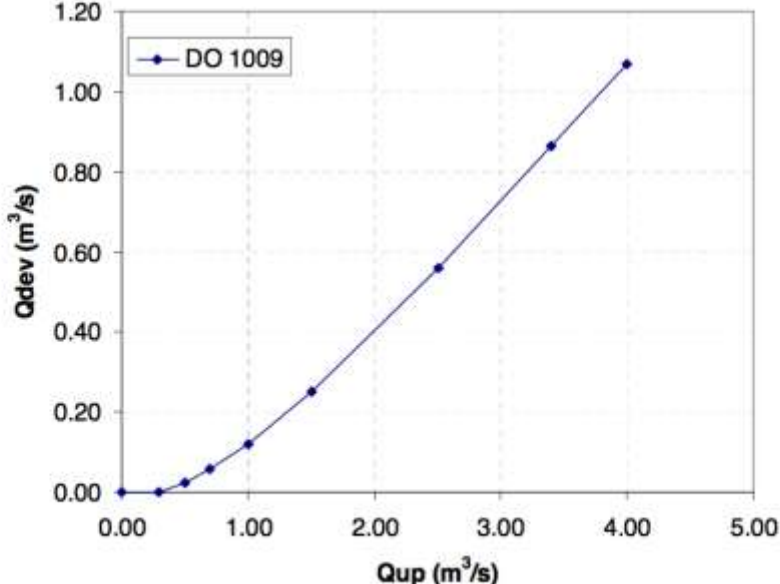
Nom	DO 330 (Déversoir du Pontet)																			
Position	Sorge aval, sur collecteur intercommunal.																			
Géométrie	Plans issus du PGEEi Mèbre Sorge, Ribl SA. Pentes amont et aval calculées par ASST-UGR.																			
Collecteurs	Amont : diamètre 100 cm, pente 0.36 % Aval (restitution STEP): diamètre 100 cm, pente aval : 0.34 % Déversement : diamètre 100 cm. Seuil positif de 29 cm entre le fond EU et le fond EC																			
Hypothèses de calcul	Calcul de la ligne d'eau et du déversement latéral selon un modèle d'écoulement 1D (Dupiro, $K_s=70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) Début de déversement lorsque la ligne d'eau atteint la dalle supérieure de la chambre (29 cm): $Q_{up,cr}=0.38 \text{ m}^3/\text{s}$ Débit restitué limité par la capacité aval du collecteur $Q_{down, max}=1.27 \text{ m}^3/\text{s}$ Débit déversé non limité par la capacité hydraulique du collecteur EC																			
Relation Q_{up} - Q_{dev}	 <table><caption>Data points estimated from the graph</caption><thead><tr><th>$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$</th><th>$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.00</td><td>0.00</td></tr><tr><td>0.38</td><td>0.00</td></tr><tr><td>0.50</td><td>0.01</td></tr><tr><td>0.75</td><td>0.03</td></tr><tr><td>1.00</td><td>0.08</td></tr><tr><td>1.25</td><td>0.12</td></tr><tr><td>1.50</td><td>0.22</td></tr><tr><td>2.00</td><td>0.72</td></tr></tbody></table>		$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$	0.00	0.00	0.38	0.00	0.50	0.01	0.75	0.03	1.00	0.08	1.25	0.12	1.50	0.22	2.00	0.72
$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$																			
0.00	0.00																			
0.38	0.00																			
0.50	0.01																			
0.75	0.03																			
1.00	0.08																			
1.25	0.12																			
1.50	0.22																			
2.00	0.72																			


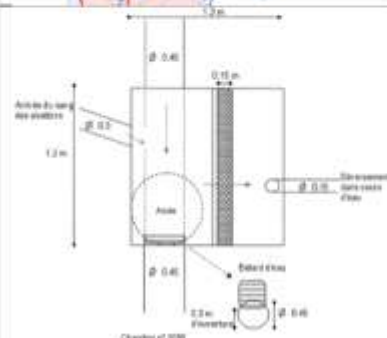
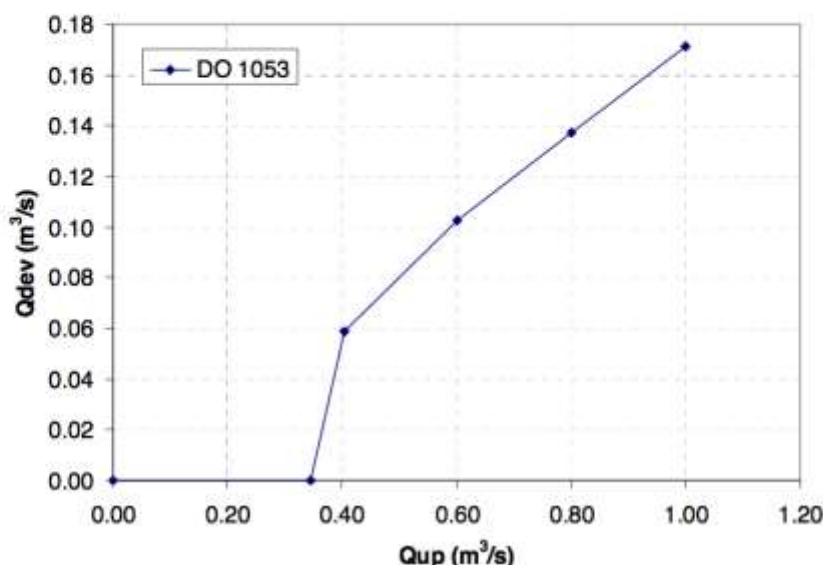
Nom	DO 138																			
Position	<p>Ruisseau de Broye.</p> <p>Situé à l'exutoire de BV H.17, en amont du DO 135 et de la restitution dans le collecteur intercommunal.</p>																			
Géométrie	<p>Plans issus du PGEE Renens, Ribl SA.</p> <p>Pente aval calculée par ASST-UGR.</p>																			
Collecteurs	<p>Amont : 1 x diamètre 70 cm.</p> <p>Aval (restitution STEP): 1x diamètre 50 cm, pente aval : 1.89 %</p>																			
Hypothèses de calcul	<p>Pas de déversement jusqu'à ce que la capacité du collecteur aval soit atteinte : $Q_{up,cr}=0.47 \text{ m}^3/\text{s}$.</p> <p>Débit restitué limité par la capacité du collecteur aval $Q_{down, max}=0.47 \text{ m}^3/\text{s}$</p>																			
Relation $Q_{up}-Q_{dev}$	 <table><caption>Data points for DO 138 relation</caption><thead><tr><th>$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$</th><th>$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.00</td><td>0.00</td></tr><tr><td>0.47</td><td>0.00</td></tr><tr><td>0.50</td><td>0.02</td></tr><tr><td>0.60</td><td>0.13</td></tr><tr><td>0.70</td><td>0.23</td></tr><tr><td>0.80</td><td>0.33</td></tr><tr><td>0.90</td><td>0.43</td></tr><tr><td>1.00</td><td>0.53</td></tr></tbody></table>		$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$	0.00	0.00	0.47	0.00	0.50	0.02	0.60	0.13	0.70	0.23	0.80	0.33	0.90	0.43	1.00	0.53
$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$																			
0.00	0.00																			
0.47	0.00																			
0.50	0.02																			
0.60	0.13																			
0.70	0.23																			
0.80	0.33																			
0.90	0.43																			
1.00	0.53																			


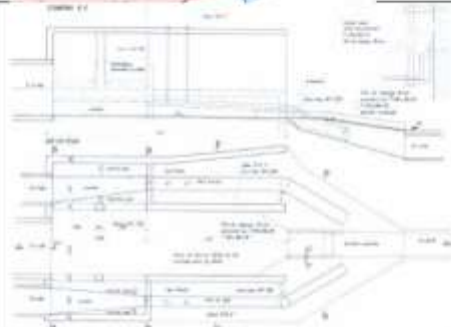
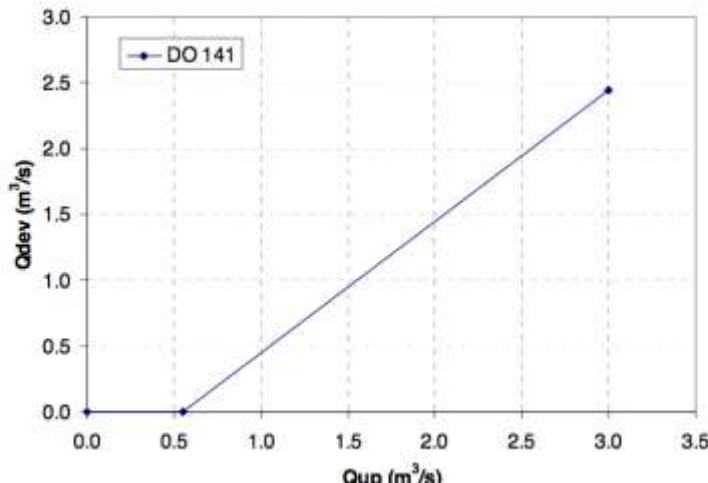
Nom	DO 210	
Position	<p>Ruisseau de Broye.</p> <p>Situé à l'exutoire de BV H.16 en amont de la restitution dans le collecteur intercommunal.</p>	

Nom	DO 1398	
Position	<p>Situé à l'exutoire de BV H.DO 1398, dans la partie intermédiaire de la Mèbre.</p> <p>Le collecteur de restitution des EU est ensuite connecté à la restitution du DO 1400 avant sa jonction avec le collecteur intercommunal.</p>	
Géométrie	<p>Plans issus du PGEE Renens, Ribl SA.</p> <p>Pentes amont et aval estimées.</p>	
Collecteurs	<p>Amont EU : 1 x diamètre 70 cm, pente 3.9 %</p> <p>Aval EU: 1 x diamètre 50 cm, pente 1.1 %</p>	
Hypothèses de calcul	<p>La perte de charge créée par le coude à l'entrée de la chambre transforme la totalité de l'énergie cinétique de l'écoulement en surélévation du plan d'eau. Le déversement est atteint lorsque la ligne d'eau atteint la crête du déversoir : $Q_{up,cr} = 0.10 \text{ m}^3/\text{s}$</p> <p>Pour les plus forts débits, limite de capacité du collecteur EU de restitution vers la STEP. Fonctionnement couplé avec le DO 1400 situé à son aval. Limite de capacité pour les DO 1398 et 1400 en fonction des superficies contributives de leur BV (53 % pour le DO 1398 et 47% pour le DO 1400) : $Q_{down, max} = 0.19 \text{ m}^3/\text{s}$.</p>	
Relation Q_{up}-Q_{dev}		


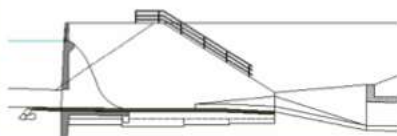
Nom	DO 1400																									
Position	<p>Situé à l'exutoire de BV H.DO 1400, dans la partie intermédiaire de la Mèbre.</p> <p>Le collecteur de restitution des EU est connecté au même collecteur de restitution que le DO 398</p>																									
Géométrie	<p>Plans issus du PGEE Renens, Ribi SA.</p> <p>Pentes amont et aval estimées.</p>																									
Collecteurs	<p>Amont EU : 1 x diamètre 80 cm, pente 3.9 %</p> <p>Aval EU: 1 x diamètre 50 cm, pente 1.1 %</p>																									
Hypothèses de calcul	<p>La perte de charge créée par le coude à l'entrée de la chambre transforme la totalité de l'énergie cinétique de l'écoulement en surélévation du plan d'eau. Le déversement est atteint lorsque la ligne d'eau atteint la crête du déversoir :</p> <p>$Q_{up,cr} = 0.11 \text{ m}^3/\text{s}$</p> <p>Pour les plus forts débits, limite de capacité du collecteur EU de restitution vers la STEP. Fonctionnement couplé avec le DO 1400 situé à son aval. Limite de capacité pour les DO 1398 et 1400 en fonction des superficies contributives de leur BV (53 % pour le DO 1398 et 47% pour le DO 1400) : $Q_{down, max} = 0.17 \text{ m}^3/\text{s}$.</p>																									
Relation Q_{up} - Q_{dev}	<table><thead><tr><th>$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$</th><th>$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.00</td><td>0.00</td></tr><tr><td>0.11</td><td>0.00</td></tr><tr><td>0.20</td><td>0.05</td></tr><tr><td>0.30</td><td>0.10</td></tr><tr><td>0.40</td><td>0.15</td></tr><tr><td>0.50</td><td>0.20</td></tr><tr><td>0.60</td><td>0.25</td></tr><tr><td>0.70</td><td>0.30</td></tr><tr><td>0.80</td><td>0.35</td></tr><tr><td>0.90</td><td>0.40</td></tr><tr><td>1.00</td><td>0.45</td></tr></tbody></table>		$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$	0.00	0.00	0.11	0.00	0.20	0.05	0.30	0.10	0.40	0.15	0.50	0.20	0.60	0.25	0.70	0.30	0.80	0.35	0.90	0.40	1.00	0.45
$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$																									
0.00	0.00																									
0.11	0.00																									
0.20	0.05																									
0.30	0.10																									
0.40	0.15																									
0.50	0.20																									
0.60	0.25																									
0.70	0.30																									
0.80	0.35																									
0.90	0.40																									
1.00	0.45																									

Nom	DO 1009																							
Position	<p>Situé dans la partie intermédiaire de la Mèbre.</p> <p>Point de rejet situé dans la Mèbre juste en amont de la jonction avec la Pétause.</p>																							
Géométrie	<p>Plans et photos issus du PGEE de Mèbre Covatane, Ribl SA.</p> <p>Pentes amont et aval vérifiées par ASST-UGR.</p>																							
Collecteurs	<p>Amont / Aval : section rectangulaire, largeur 100 cm, hauteur 76 cm, pente 1.15 %</p> <p>2 ouvertures latérales, longueur 2 m, hauteur 20 cm situées en rive gauche à 16 cm de hauteur et en rive droite à 28 cm de hauteur.</p>																							
Hypothèses de calcul	<p>Calcul de la ligne d'eau et des déversements latéraux (gauche et droite) selon un modèle d'écoulement 1D (Dupiro, $K_s=70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$).</p> <p>Débit critique de déversement : $Q_{up,cr} = 0.29 \text{ m}^3/\text{s}$.</p>																							
Relation Q_{up} - Q_{dev}	 <table><caption>Data points estimated from the graph</caption><thead><tr><th>$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$</th><th>$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.00</td><td>0.00</td></tr><tr><td>0.20</td><td>0.00</td></tr><tr><td>0.40</td><td>0.01</td></tr><tr><td>0.60</td><td>0.05</td></tr><tr><td>0.80</td><td>0.10</td></tr><tr><td>1.00</td><td>0.15</td></tr><tr><td>1.50</td><td>0.25</td></tr><tr><td>2.50</td><td>0.55</td></tr><tr><td>3.50</td><td>0.85</td></tr><tr><td>4.00</td><td>1.05</td></tr></tbody></table>		$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$	0.00	0.00	0.20	0.00	0.40	0.01	0.60	0.05	0.80	0.10	1.00	0.15	1.50	0.25	2.50	0.55	3.50	0.85	4.00	1.05
$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$																							
0.00	0.00																							
0.20	0.00																							
0.40	0.01																							
0.60	0.05																							
0.80	0.10																							
1.00	0.15																							
1.50	0.25																							
2.50	0.55																							
3.50	0.85																							
4.00	1.05																							

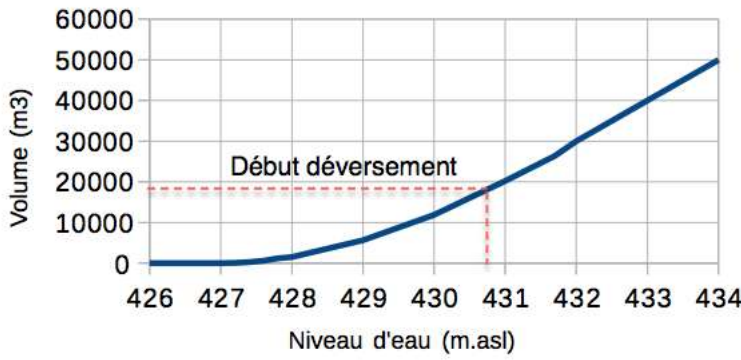
Nom	DO 1053															
Position	Situé dans la partie supérieure de la Mèbre.															
Géométrie	Plans et photos issus du PGEE de Mèbre Covatane, Ribì SA. Pente aval vérifiée par ASST-UGR.															
Collecteurs	Amont / Aval : 1 x diamètre 45 cm, pente aval 1.76 % (moyenne sur 210 m) Déversement : 1 x diamètre 15 cm, pente 18.1 %															
Hypothèses de calcul	Pas de déversement jusqu'à ce que la capacité du collecteur aval soit atteinte : $Q_{up,cr} = 0.34\text{m}^3/\text{s}$. Débit max déversé avant mise en charge complète de la chambre : 0.06 m ³ /s. Au-delà pour les plus forts débits, évacuation par les collecteurs de restitution (45 cm) et de déversement (15 cm) au prorata de leur capacité.															
Relation Q_{up} - Q_{dev}	 <table><caption>Data points for the Qup-Qdev relationship (DO 1053)</caption><thead><tr><th>$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$</th><th>$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.00</td><td>0.00</td></tr><tr><td>0.34</td><td>0.00</td></tr><tr><td>0.40</td><td>0.06</td></tr><tr><td>0.60</td><td>0.10</td></tr><tr><td>0.80</td><td>0.14</td></tr><tr><td>1.00</td><td>0.17</td></tr></tbody></table>		$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$	0.00	0.00	0.34	0.00	0.40	0.06	0.60	0.10	0.80	0.14	1.00	0.17
$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$															
0.00	0.00															
0.34	0.00															
0.40	0.06															
0.60	0.10															
0.80	0.14															
1.00	0.17															

Nom	DO 141									
Position	<p>Ruisseau de Broye.</p> <p>Point de rejet situé juste en amont de la jonction avec la Mèbre.</p>									
Géométrie	<p>Plans fournis par ASST-UGR</p> <p>Pentes amont et aval calculées par ASST-UGR.</p>									
Collecteurs	<p>Amont : 2 x diamètre 80 cm, pente 1.12 %</p> <p>Chambre : réduction des 2 collecteurs (1 x 30 cm et 1 x 40 cm), pente 4 %</p> <p>Aval (restitution STEP): diamètre 70 cm, pente aval : 1.12 %</p>									
Hypothèses de calcul	<p>Répartition du débit dans les deux collecteurs amont proportionnelle à leur capacité.</p> <p>Pas de déversement jusqu'à ce que la capacité des deux collecteurs réduits soit atteinte : $Q_{up,cr}=0.56 \text{ m}^3/\text{s}$.</p> <p>Débit restitué limité par la capacité aval des collecteurs réduits $Q_{down, max}=0.56 \text{ m}^3/\text{s}$</p>									
Relation Q_{up} - Q_{dev}	 <table><caption>Data points for DO 141 relation</caption><thead><tr><th>$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$</th><th>$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.0</td><td>0.0</td></tr><tr><td>0.56</td><td>0.0</td></tr><tr><td>3.0</td><td>2.5</td></tr></tbody></table>		$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$	0.0	0.0	0.56	0.0	3.0	2.5
$Q_{up} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{dev} \text{ (m}^3/\text{s)}$									
0.0	0.0									
0.56	0.0									
3.0	2.5									

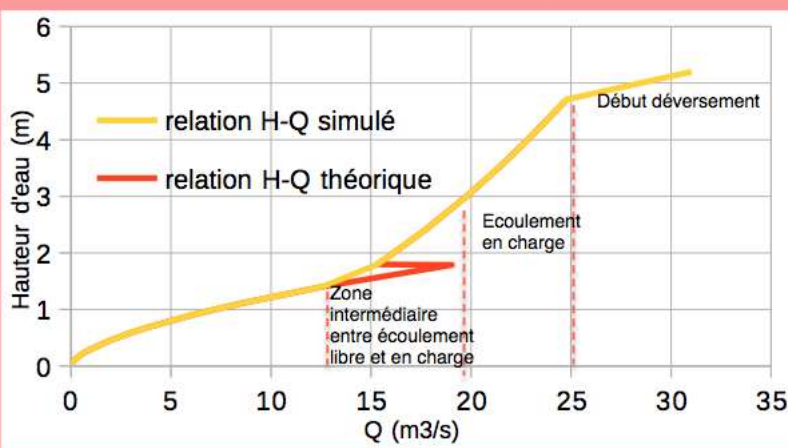
B. Bassins de rétention


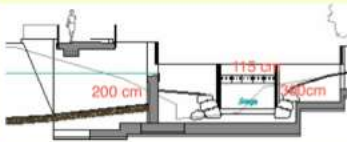
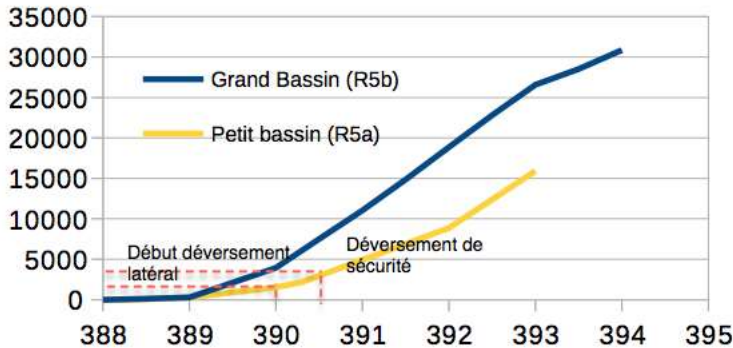
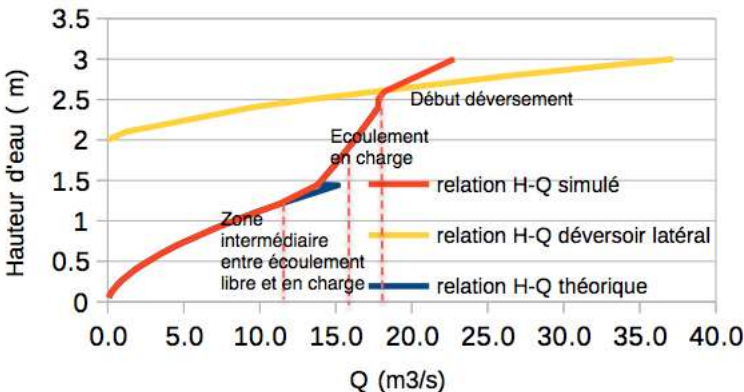
Nom		R2		
Position	L'ouvrage se situe à Crissier derrière le centre commercial de Crissier, juste avant le voutage V2 passant sous l'autoroute.			
Géométrie	Construit en 2001-2002 par BOSS Ingénieur. Volume de rétention: 30'950 m3			
Dimension	Niveau du lit	z0	426	masl
	pente talu (v/h)	m	0.67	mv/mh
	pente du cours d'eau	J	0.009	m/m
	Coefficient de strickler	K	20	m ^{1/3} /s
	hauteur de l'orifice	h	1.79	m
	largeur orifice	b	2.4	m
	Côte du seuil du déversoir de sécurité	H	4.7	m
	Charge sur déversoir de sécurité	Hmax	1	m
	longueur du déversoir de sécurité	B	10	m
	Coefficient de débit de l'orifice en écoulement à surface libre [-]	Cdo	0.37	-
	CDCH: Coefficient de l'écoulement en charge	Cdch	0.6	-
	Coefficient de débit du déversoir de sécurité	Cds	0.4	-

Relation Niveau/volume



Relation niveau/débit



Nom		R5
Position	L'ouvrage se à Chavanne au-dessus de l'EPFL sur la Sorge à côté des stades de foot	
Géométrie	Construit en 2001-2002 par BOSS Ingénieur. Volume de rétention : 18'720 (m3)	
Dimension	<div> <div>Niveau du lit</div> <div>z0</div> <div>388</div> <div>masl</div> </div> <div> <div>pente talu (v/h)</div> <div>m</div> <div>0.67</div> <div>mv/mh</div> </div> <div> <div>pente du cours d'eau</div> <div>J</div> <div>0.009</div> <div>m/m</div> </div> <div> <div>Coefficient de strickler</div> <div>K</div> <div>23</div> <div></div> </div> <div> <div>hauteur de l'orifice</div> <div>h</div> <div>1.47</div> <div>m</div> </div> <div> <div>largeur orifice</div> <div>b</div> <div>3</div> <div>m</div> </div> <div> <div>Côte du seuil du déversoir de sécurité</div> <div>H</div> <div>2.5</div> <div>m</div> </div> <div> <div>Charge sur déversoir de sécurité</div> <div>Hmax</div> <div>0.5</div> <div>m</div> </div> <div> <div>longueur du déversoir de sécurité</div> <div>B</div> <div>8</div> <div>m</div> </div> <div> <div>Côte du seuil du déversoir latéral</div> <div>HI</div> <div>2</div> <div>m</div> </div> <div> <div>Longeur du déversoir latéral</div> <div>BI</div> <div>14</div> <div>m</div> </div> <div> <div>Coefficient de débit de l'orifice en écoulement à surface libre [-]</div> <div>Cdo</div> <div>0.55</div> <div>-</div> </div> <div> <div>CDCH: Coefficient de l'écoulement en charge</div> <div>Cdch</div> <div>0.6</div> <div>-</div> </div> <div> <div>Coefficient de débit du déversoir de sécurité</div> <div>Cds</div> <div>0.4</div> <div>-</div> </div>	
Relation Niveau/volume		
Relation niveau/débit		

Nom

R8

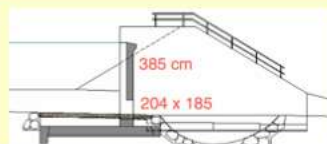
Position

L'ouvrage se situe à Crissier le long de la Mèbre sous la route de Prilly.



Géométrie

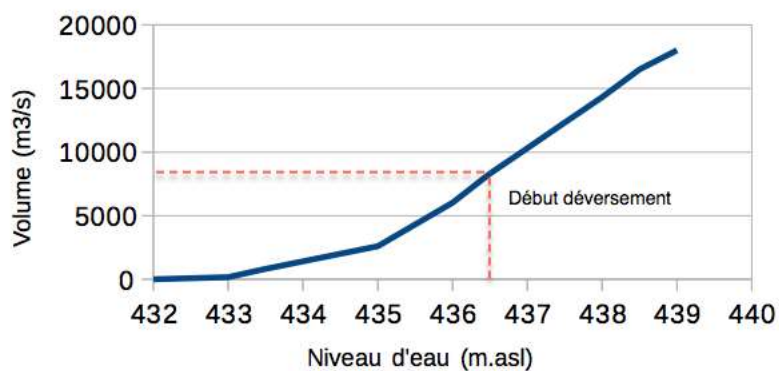
Construit en 2001-2002 par BOSS Ingénieur. Volume de rétention : 14'650 (m3)



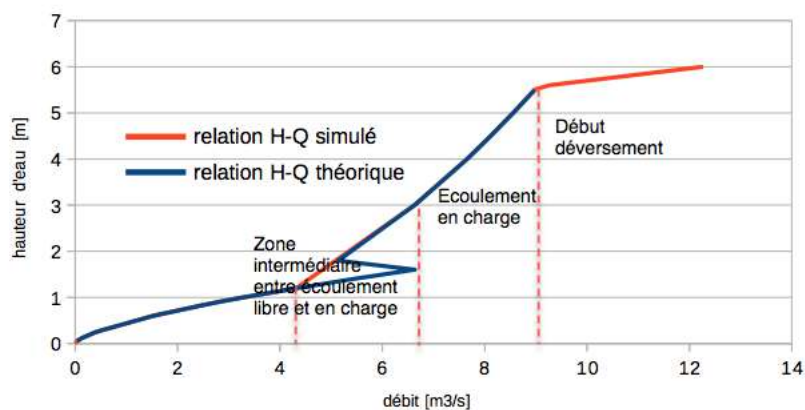
Dimension

Niveau du lit	z0	432	masl
pente talu (v/h)	m	0.67	mv/mh
pente du cours d'eau	J	0.007	m/m
Coefficient de strickler	K	20	m ^{1/3} /s
hauteur de l'orifice	h	2.11	m
largeur orifice	b	2.4	m
Côte du seuil du déversoir de sécurité	H	4.5	m
Charge sur déversoir de sécurité	Hmax	1	m
longueur du déersoir de sécurité	B	10	m
Coefficient de débit de l'orifice en écoulement à surface libre [-]	Cdo	0.37	-
CDCH: Coefficient de l'écoulement en charge	Cdch	0.54	-
Coefficient de débit du déversoir de sécurité	Cds	0.21	-

Relation Niveau/volume



Relation niveau/débit

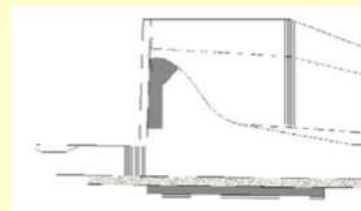


Nom**R9****Position**

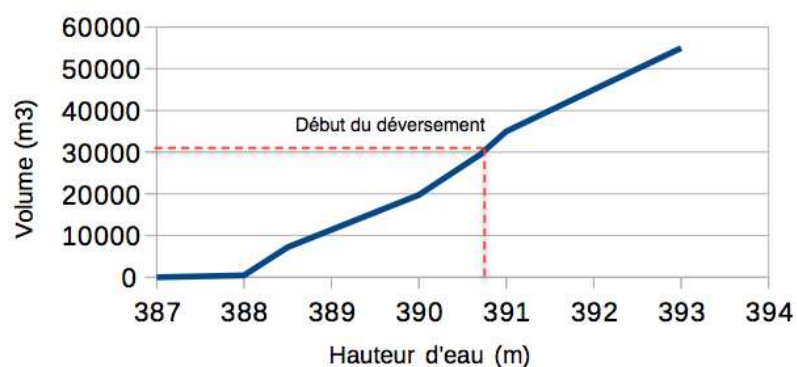
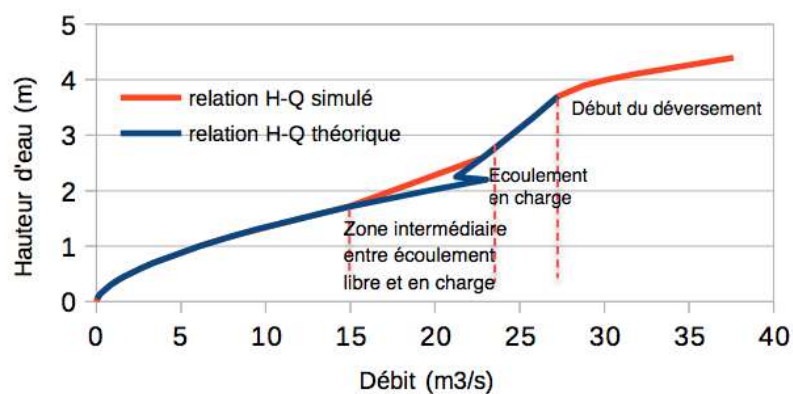
L'ouvrage se situe à Chavanne sur la Mère entre l'autoroute et la route de la Maladière.

**Géométrie**

Construit en 2001-2002 par BOSS Ingénieur. Volume de rétention : 29'250 (m3)

**Dimension**

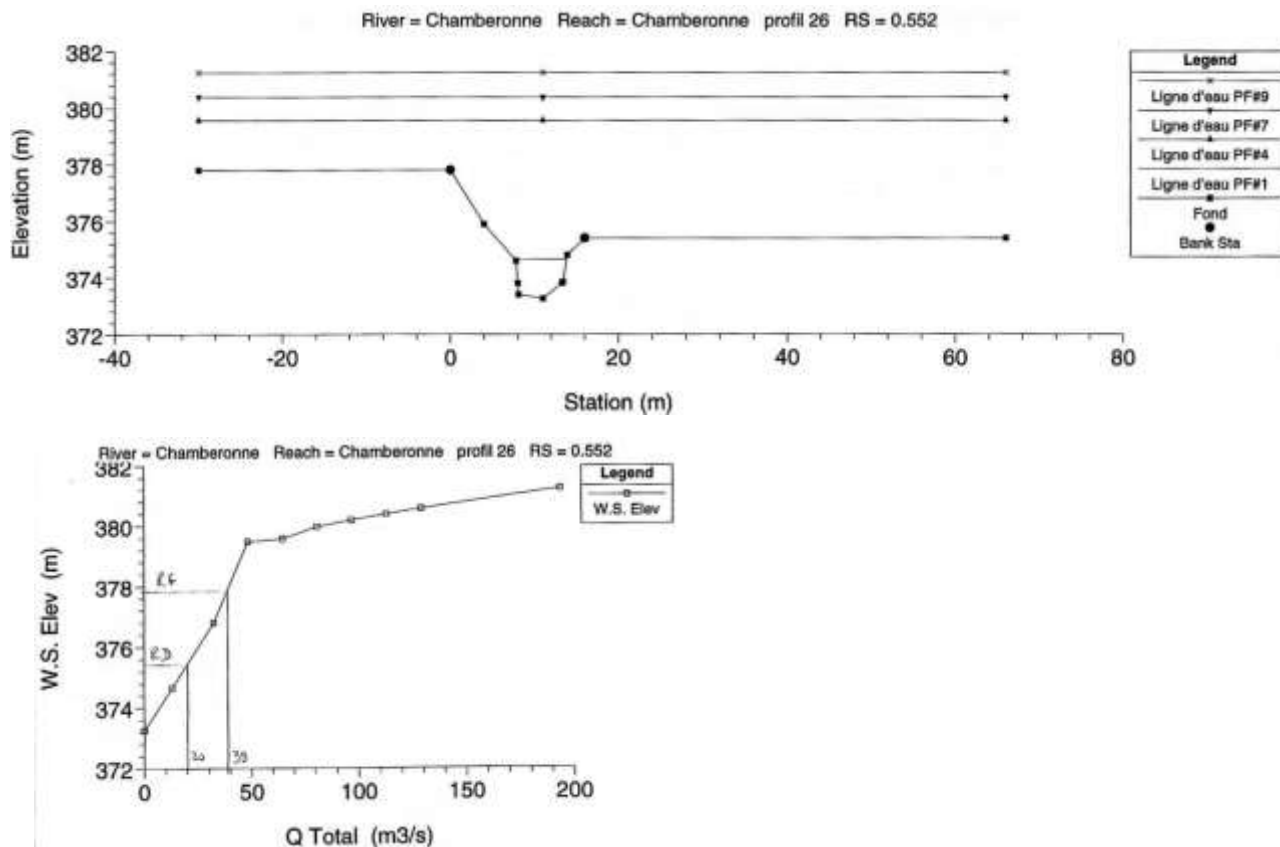
Niveau du lit	z0	387	masl
pente talu (v/h)	m	0.67	mv/mh
pente du cours d'eau	J	0.008	m/m
Coefficient de strickler	K	18	m ^{1/3} /s
hauteur de l'orifice	h	1.59	m
largeur orifice	b	3	m
Côte du seuil du déversoir de sécurité	H	3.7	m
Charge sur déversoir de sécurité	Hmax	1.3	m
longueur du déersoir de sécurité	B	10	m
Coefficient de débit de l'orifice en écoulement à surface libre [-]	Cdo	0.42	-
CDCH: Coefficient de l'écoulement en charge	Cdch	0.82	-
Coefficient de débit du déversoir de sécurité	Cds	0.5	-

Relation Niveau/volume**Relation niveau/débit**

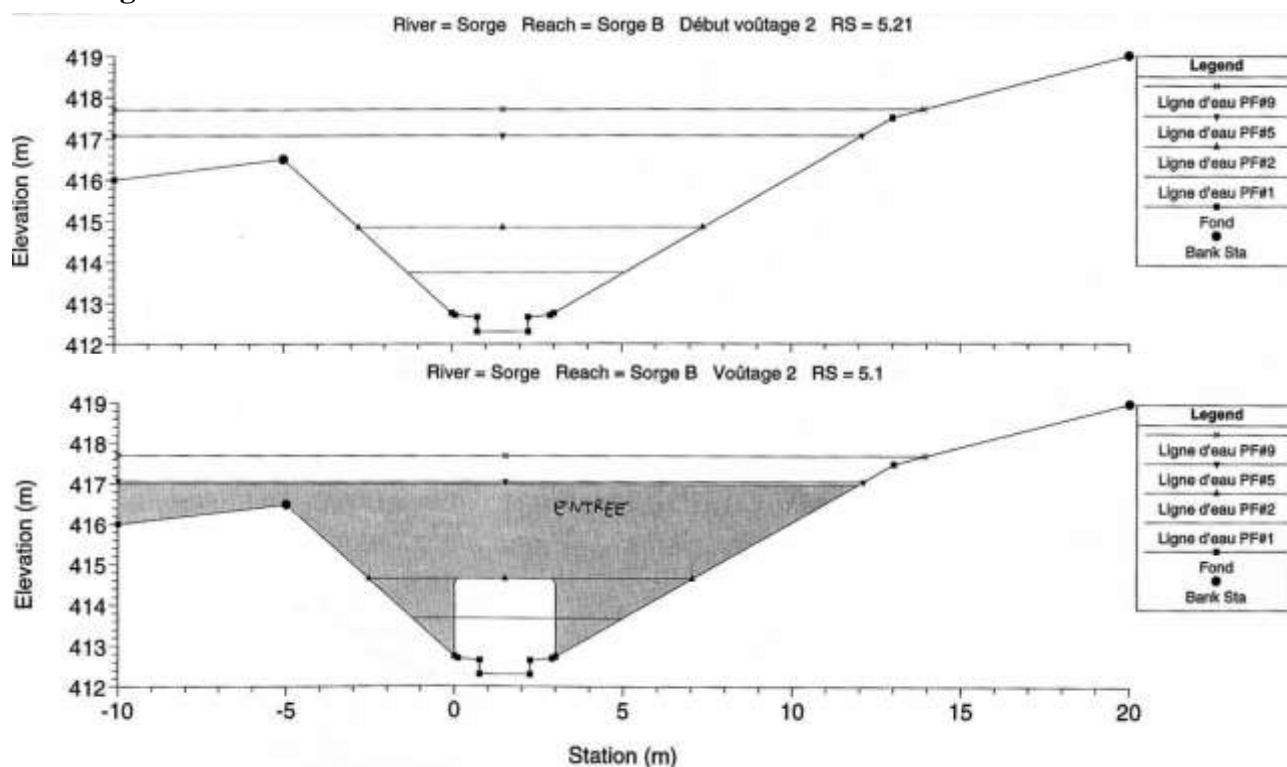
C. Capacité hydraulique des zones à risque d'inondation

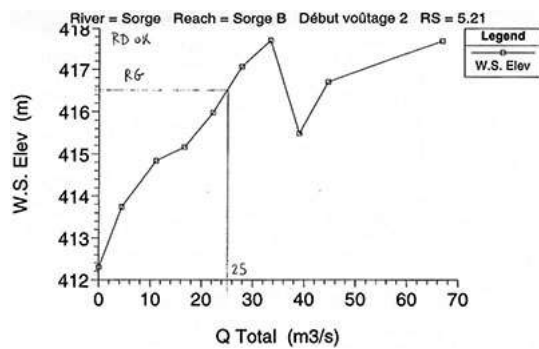
Les données ont été photocopiées du rapport "LCH-EPFL (a). (1999). Etude hydrologique et hydraulique des aménagements de protection contre les crues. Calcul hydraulique de lignes d'eau et détermination des débits de débordement dans l'état actuel. LCH-EPFL, Lausanne"

- Station limnimétrique Chamberonne

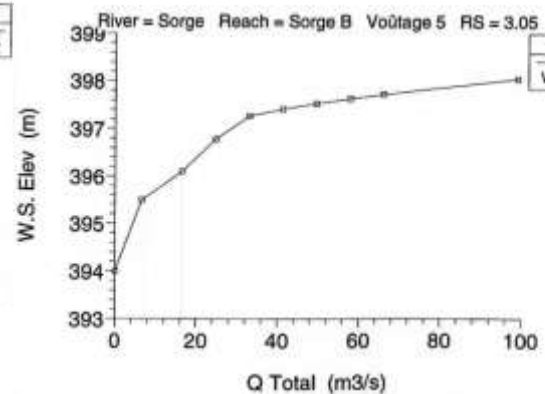
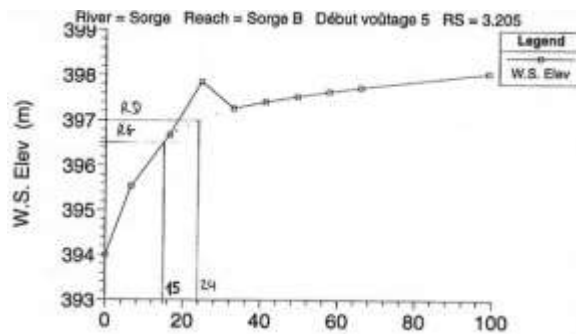
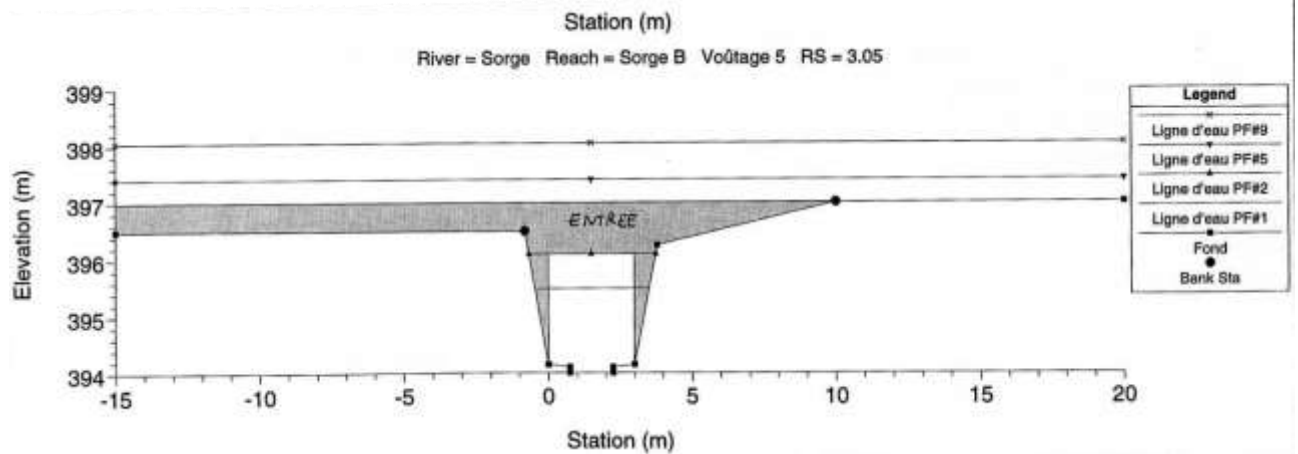
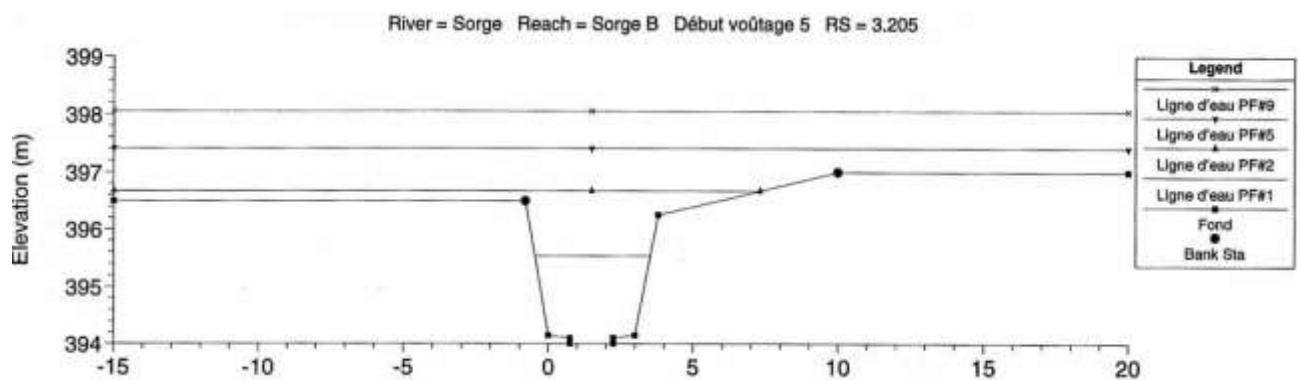


- Voutage 2

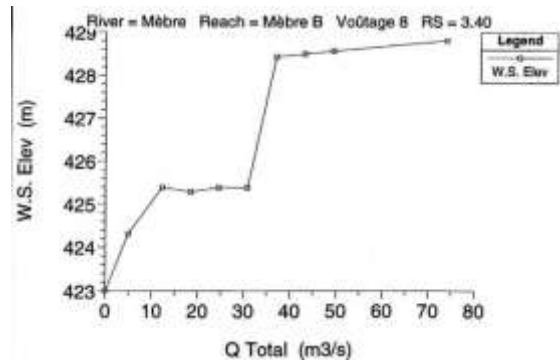
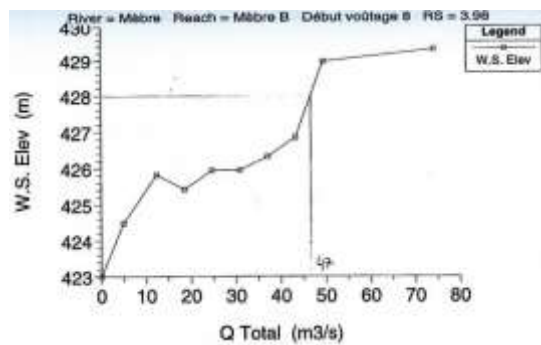
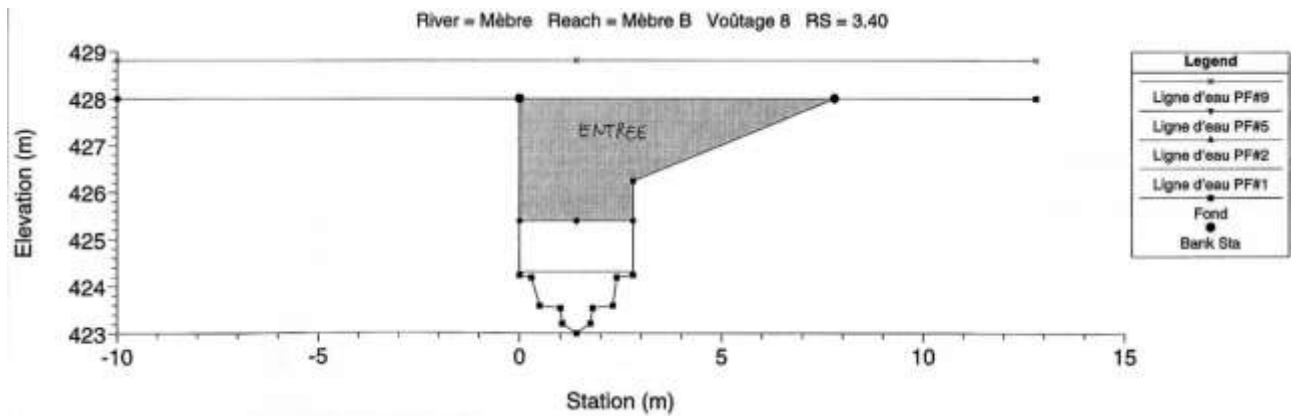
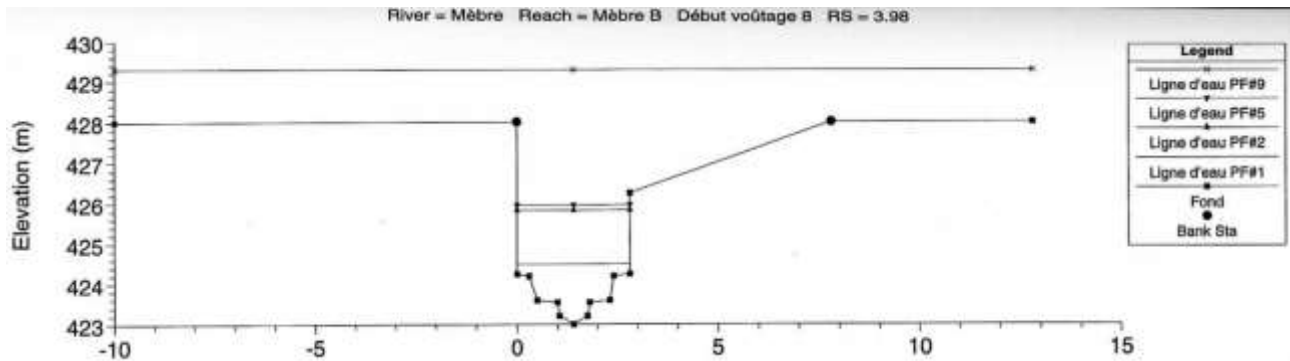




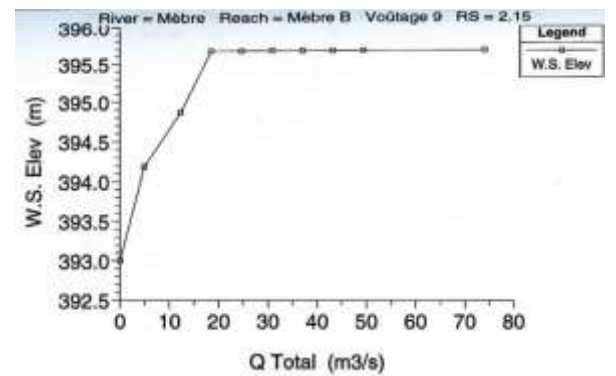
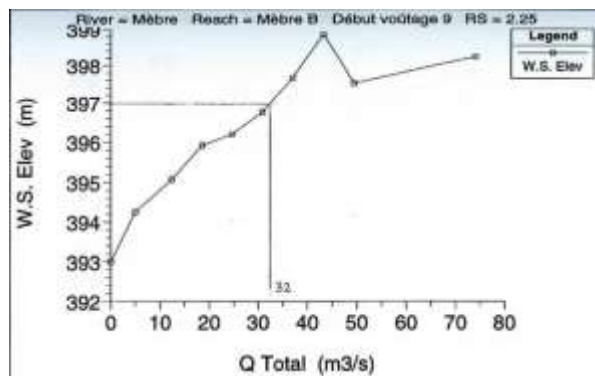
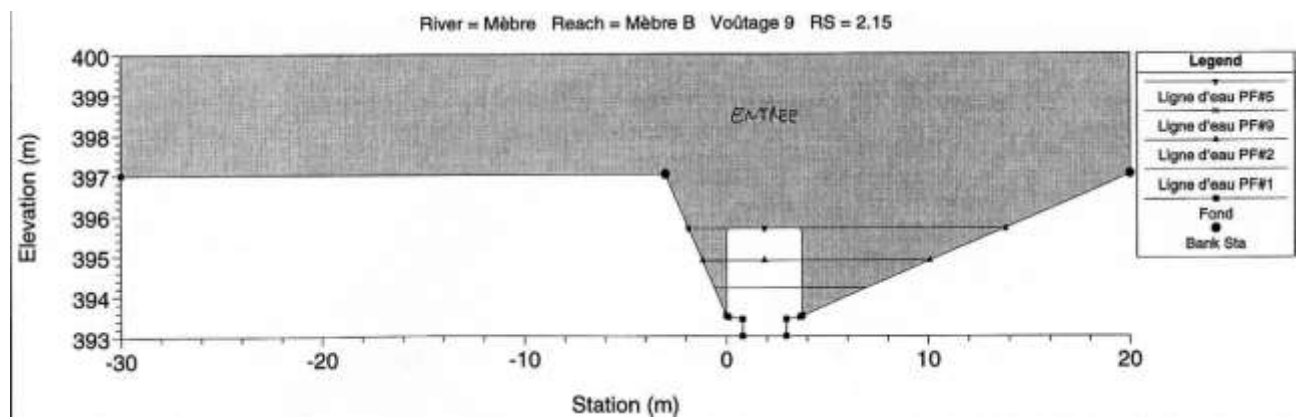
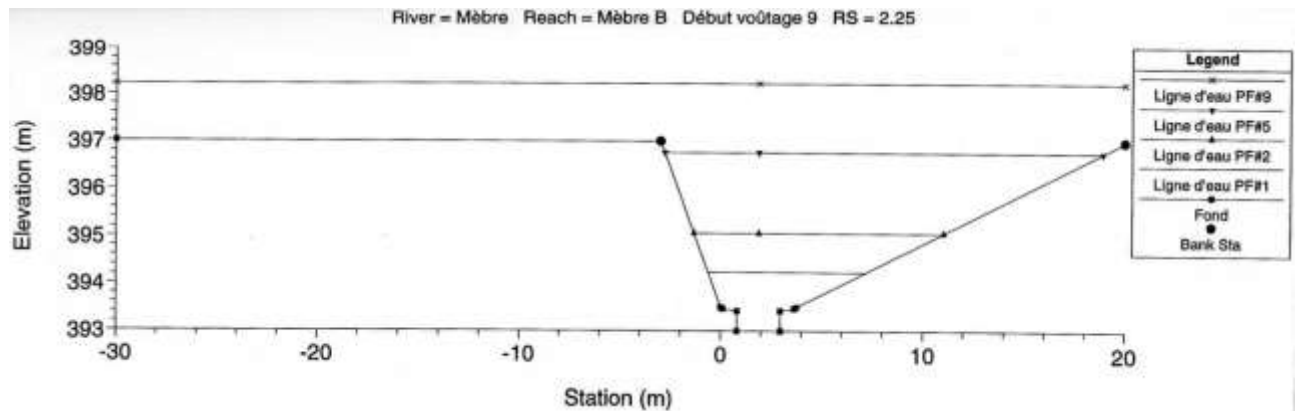
- Voutage 5



- voutage 8

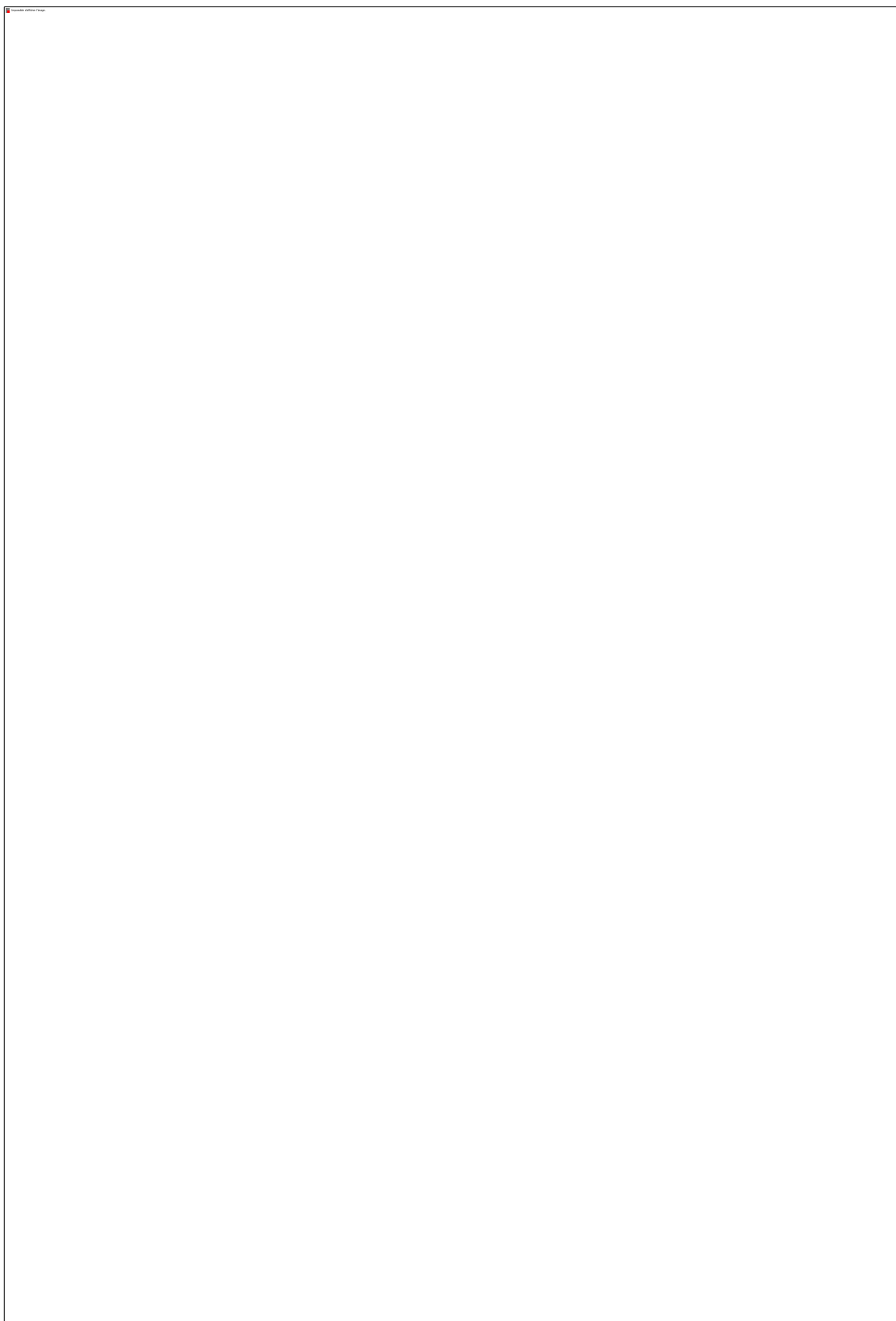


- voutage 9

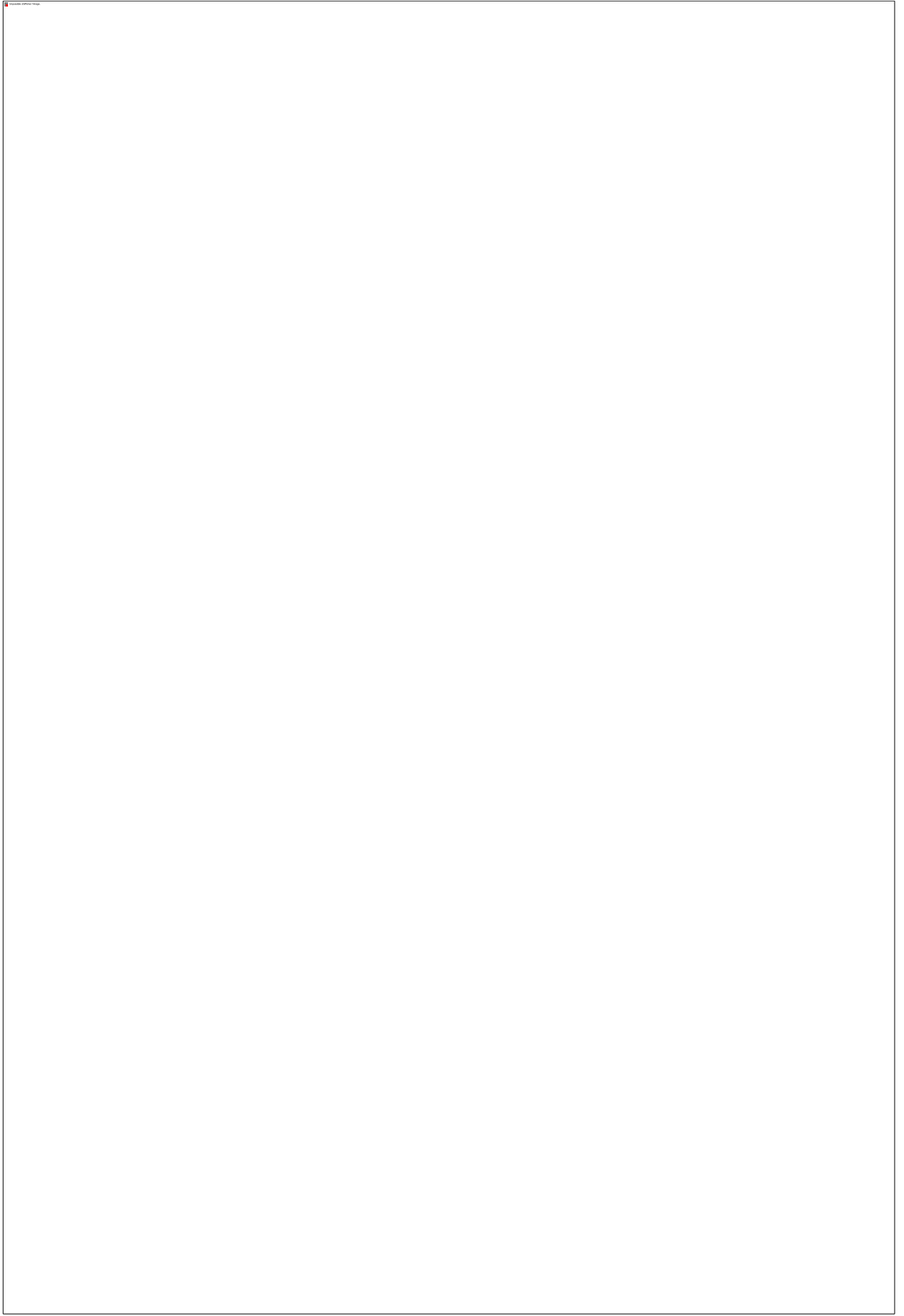


D. Stations limnimétrique

- **Station de Chatelard (Petite Chamberonne)**



- **Station Mèbre amont (Passerelle)**



- station Sorge



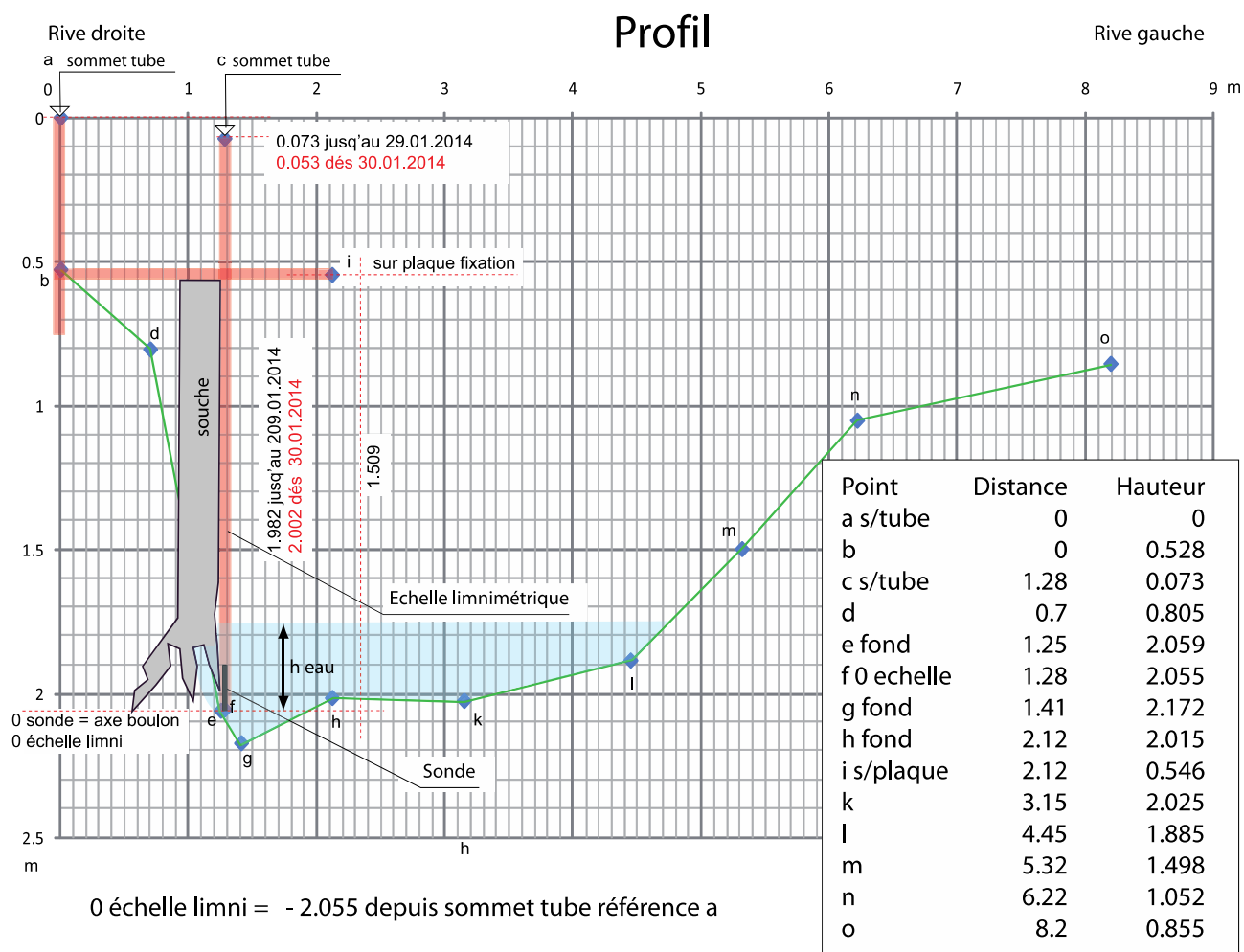
Station Sorge

Coord.: 533'462 / 157'182

Sonde HydroMadd : no 1170

avec capteur H : 2m.

Mise en service le 08.12.2009 12h50 (heures GMT+1)



E. Hyetogrammes du bassins versant de la Chamberonne selon les valeurs radar fourni par MétéoSuisse

Source: AquaVision, 2009

